

**Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia**

**Mestrado em Engenharia da Energia Solar**

Dissertação

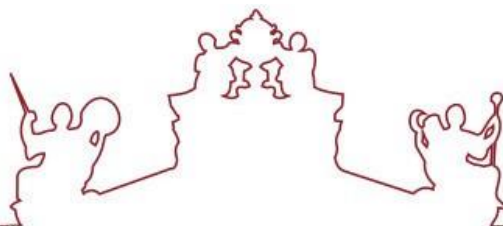
**Sistemas híbridos solar térmico/biomassa como alternativa  
para produção de calor de processo**

**Filipe Madeira Correia Gonçalves**

Orientador(es) | Ricardo Nepomuceno Pereira  
Isabel Maria Pereira Bastos Malico

Évora 2019





**Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia**

**Mestrado em Engenharia da Energia Solar**

Dissertação

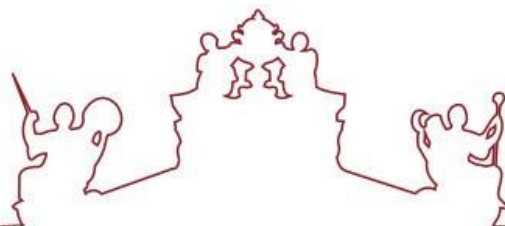
**Sistemas híbridos solar térmico/biomassa como alternativa  
para produção de calor de processo**

**Filipe Madeira Correia Gonçalves**

Orientador(es) | Ricardo Nepomuceno Pereira  
Isabel Maria Pereira Bastos Malico

Évora 2019





A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

- Presidente | Diogo Canhão de Sousa Canavarro (Universidade de Évora)
- Vogal | Maria João Costa (Universidade de Évora)
- Vogal-orientador | Isabel Maria Pereira Bastos Malico (Universidade de Évora)



## Agradecimentos

Apesar de estas serem as primeiras palavras a serem lidas, são na verdade as últimas a serem escritas e, como tal, acarretam consigo uma carga de sentimentos de alívio e satisfação por este trabalho estar terminado. É nesta altura que se passa em revista o tempo que passou, de trabalho, de dedicação e de esforço, mas também de muitas dúvidas e incertezas, de avanços e recuos constantes.

Gostaria primeiramente de agradecer à minha orientadora, a professora Isabel Malico, por me ter dado a oportunidade de realizar esta dissertação sobre a sua orientação, por toda a disponibilidade e paciência em atender as minhas dúvidas e por toda a dedicação, conhecimento e rigor demonstrados desde a primeira hora. Agradecer também ao meu coorientador, Ricardo Nepomuceno Pereira, por toda a disponibilidade e conhecimento demonstrados ao longo de todo este trabalho, que sem a sua ajuda teria sido manifestamente mais difícil de ser concluído.

Aos meus pais um enorme obrigado pelo apoio incondicional demonstrado ao longo desta caminhada, por nunca deixarem que me faltasse nada ao longo destes anos, tanto na conclusão da licenciatura como agora do mestrado. Sem eles nada disto teria sentido e o que conquistei até agora e o que poderei vir a conquistar no futuro a eles o devo.

À minha namorada Ana Rita um enorme obrigado, por todo o carinho, compreensão, apoio e companheirismo demonstrados ao longo destes últimos anos da minha vida. Sem ela nada disto teria sido possível.

Ao meu irmão e a todos os meus amigos também o meu muito obrigado pela preocupação, interesse e companheirismo que sempre demonstraram.



## Resumo

O sector industrial possui elevadas necessidades de calor para os mais diversos tipos de processos. As fontes para a obtenção deste tipo de calor provém, na sua grande maioria, de recursos não renováveis, como o petróleo ou o gás natural, recursos que deveriam ter, numa política de futuro sustentável, uma quota de utilização cada vez mais reduzida no futuro. A utilização de energia proveniente de recursos renováveis para a obtenção de calor na indústria ainda é actualmente muito escassa, estando practicamente circunscrita à utilização de biomassa, através da combustão de resíduos.

Nesta dissertação avalia-se qual o impacto, tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista económico, da introdução de um sistema solar térmico para obtenção de calor, através da hibridização com um sistema de biomassa, para o processo de cozedura das pranchas de cortiça natural. Foi realizado o dimensionamento do sistema, tendo sido definido um diagrama esquemático do sistema híbrido.

Os resultados da análise energética mostram que a implementação do sistema solar térmico é viável do ponto de vista energético, e que a instalação deste tipo de tecnologia no que toca à produção de calor para processos que requeiram temperaturas baixas apresenta potencial para ser explorado. Foi analisado o impacto ambiental da implementação do sistema solar térmico, através de duas perspectivas de análise diferentes: a das emissões de GEE do pó de cortiça evitadas pela introdução do sistema solar térmico e as emissões de GEE evitadas pelo sistema híbrido solar térmico/biomassa, comparativamente a se o sistema tivesse como fonte de combustível o gás natural. Foi realizada também uma análise económica do sistema, através do SolTerm, sendo que o método usado para fazer a análise económica do sistema foi o *Discounted cash flow method*. Verificou-se que a introdução do sistema solar não é compensatória do ponto de vista económico, pois o pó de cortiça, um subproduto da própria indústria da cortiça que na grande maioria das vezes é utilizado como fonte energética, possui um valor de mercado bastante baixo. Foram apresentadas algumas soluções e que incentivos económicos seriam necessários para tornar viável a instalação de sistemas solares para produção de calor na indústria da cortiça no futuro.

Palavras-chave: Energia; Solar térmico; Biomassa; Calor de processo; Indústria da cortiça



## Abstract

### **“Hybrid solar thermal/biomass systems as an alternative for process heat production”**

The industrial sector has high heat requirements for the most diverse types of processes. Most of the sources of this type of heat come from non-renewable resources, such as oil or natural gas, which should have an increasingly shrinking share in the future. . The use of energy from renewable sources for obtaining heat in industry is still very scarce at the moment, being practically circumscribed to the use of biomass, through the combustion of residues.

In this dissertation it is evaluated the impact, both from an energy and economic point of view, of the introduction of a solar thermal system to obtain heat, through hybridization with a biomass system, for the baking process of the boards of natural cork. The sizing of the system was performed, and a schematic diagram of the hybrid system was defined.

The results of the energy analysis show that the implementation of the solar thermal system is feasible from the energy point of view, and that the installation of this type of technology in the production of heat for processes that require low temperatures presents the potential to be explored. The environmental impact of the implementation of the solar thermal system was analyzed through two different perspectives: the GHG emission of cork dust avoided by the introduction of the solar thermal system and the GHG emissions avoided by the hybrid solar thermal / biomass system, compared to if the system had natural gas as fuel. An economic analysis of the system was also performed through SolTerm, and the method used to make the economic analysis of the system was the Discounted cash flow method. It has been found that the introduction of the solar system is not economically compensatory, since cork dust, a byproduct of the cork industry itself, which in most cases is used as an energy source, has a fairly low market value . Some solutions were presented and economic incentives would be required to make feasible the installation of solar systems for the production of heat in the cork industry in the future.

**Keywords:** Energy; Solar thermal; Biomass; Process heat; Cork industry





## Índice geral

|  |      |
|--|------|
| Resumo .....   | ii   |
| Abstract.....  | iii  |
| Índice de Figuras .....  | vi   |
| Índice de Tabelas .....  | viii |
| 1. Introdução .....  | 1    |
| 1.1. Contextualização.....   | 1    |
| 1.2. Objectivos do trabalho .....  | 10   |
| 1.3. Estrutura da dissertação .....  | 11   |
| 2. Sistemas e tecnologias de energia solar térmica.....                                      | 13   |
| 2.1. Sistemas de energia solar térmica .....   | 15   |
| 2.2. Tecnologias de energia solar térmica.....   | 27   |
| 2.3. Custos dos diferentes sistemas de energia solar térmica .....                           | 37   |
| 3. O sector da cortiça .....   | 43   |
| 3.1. O montado e a cortiça .....   | 43   |
| 3.2. Caracterização da indústria da cortiça .....  | 44   |
| 3.2.1. Exportações .....   | 46   |
| 3.2.2. Importações .....   | 47   |
| 3.2.3. O mercado dos produtos de cortiça .....   | 48   |
| 3.2.4. Resíduos de cortiça com potencial de aproveitamento energético .....                  | 49   |
| 3.3. Processos de produção e necessidades de calor na indústria da cortiça .....             | 50   |
| 3.3.1. Preparação das pranchas de cortiça .....  | 51   |
| 3.3.1.1. Cozedura das pranchas de cortiça.....   | 52   |
| 3.3.1.2. Processo de secagem das pranchas de cortiça .....                                   | 53   |
| 3.3.2. Processo de aglomeração.....  | 54   |
| 4. Sistema solar térmico/biomassa para gerar calor de processo na indústria da cortiça ..... | 56   |
| 4.1. Esquematização do sistema híbrido solar térmico/biomassa .....                          | 56   |
| 4.2. Dimensionamento do sistema .....  | 59   |
| 4.3. Análise energética do sistema proposto .....  | 71   |
| 4.4. Análise do impacto ambiental do sistema híbrido .....                                   | 79   |



---

|  |    |
|--|----|
| 5. Análise de viabilidade económica do sistema híbrido proposto.....   | 82 |
| 5.1. Cenário e resultados económicos do sistema.....   | 82 |
| 5.2. Programas de incentivos económicos para viabilizar a instalação de um sistema solar na indústria da cortiça ..... | 85 |
| 6. Conclusões.....   | 91 |
| 7. Referências .....   | 95 |





## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Contribuição dos diversos sectores no consumo de energia final para os países da UE28, para o ano de 2016. Fonte: Eurostat (2018) .....   | 1  |
| Figura 2: Contribuição das diferentes utilizações no consumo de energia final na indústria para os países da UE28, para o ano de 2012. Fonte: Fraunhofer et al. (2016) .....  | 2  |
| Figura 3: Contribuição dos requisitos em termos de temperatura das necessidades de calor de processo para a indústria nos países da UE28, para o ano de 2012. Fonte: Fraunhofer et al. (2016) .....   | 3  |
| Figura 4: Contribuição de cada fonte energética no consumo de energia final no sector da indústria para a UE28, no ano de 2016. Fonte: Eurostat (2018) .....  | 4  |
| Figura 5: Mapa mundial da radiação global horizontal, em termos diários e anuais. Fonte: <a href="https://solargis.info/">https://solargis.info/</a> .....  | 13 |
| Figura 6: Mapa português da radiação global horizontal, em termos anuais. Fonte: <a href="https://solargis.info">https://solargis.info</a> .....  | 14 |
| Figura 7: Circuito hidráulico que liga e faz a transferência de energia entre os colectores e o depósito, sendo a) um circuito sem permutador de calor e b) um circuito com permutador de calor. Fonte: <a href="http://www.cienciaviva.pt">http://www.cienciaviva.pt</a> ..... | 18 |
| Figura 8: Sistema solar térmico para pré-aquecimento de um processo industrial. Fonte: Helmke e Hess (2015) .....   | 23 |
| Figura 9: Sistema solar térmico para aquecimento de um processo industrial.....   | 24 |
| Figura 10: Sistema solar térmico para pré-aquecimento ou aquecimento do ar. Fonte: Helmke e Hess (2015) .....   | 25 |
| Figura 11: Geração directa de vapor solar. Fonte: Helmke e Hess (2015).....   | 26 |
| Figura 12: Geração indirecta de vapor solar. Fonte: Helmke e Hess (2015).....   | 26 |
| Figura 13: Esquema explicativo sobre as diferenças entre as tecnologias de energia solar térmica. Fonte: Janse van Vuuren et al. (2017) .....   | 28 |
| Figura 14: Exemplo de um coletor solar plano envidraçado. Fonte: <a href="http://www.energiasolar.lat">http://www.energiasolar.lat</a> .....  | 31 |
| Figura 15: Exemplo de um coletor solar plano sem vidro. Fonte: <a href="https://floridasolardesigngroup.com">https://floridasolardesigngroup.com</a> .....  | 31 |
| Figura 16: Exemplo de um coletor solar de tubos de vácuo. Fonte: <a href="http://www.fastresponseplumbing.com">http://www.fastresponseplumbing.com</a> .....  | 32 |
| Figura 17: Esquema do princípio de funcionamento de um coletor solar do tipo CPC. Fonte: Devanarayanan e Murugavel (2014) .....   | 33 |
| Figura 18: Vários colectores CPC combinados com tubos de vácuo. Fonte: <a href="http://www.sunbest.solar">http://www.sunbest.solar</a> .....  | 34 |
| Figura 19: Exemplo de um coletor cilindro-parabólico. Fonte: <a href="http://www.macoga.com">http://www.macoga.com</a> .....  | 35 |
| Figura 20: Exemplo de um coletor cilindro-parabólico. Fonte: <a href="http://www.macoga.com">http://www.macoga.com</a> .....  | 36 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 21: Gama de temperaturas para diferentes tecnologias e indústrias. Fonte: Horta (2015) .....   | 37 |
| Figura 22: Custo específico dos sistemas solares térmicos em função da área de colectores solares planos.....   | 38 |
| Figura 23: Empresas portuguesas da indústria da cortiça por sector de actividade económica em 2017. Fonte: GEP (2017) .....   | 45 |
| Figura 24: Estrutura das exportações portuguesas de cortiça em 2017 por tipo de produtos em valor facturado. Fonte: INE (2017) .....  | 48 |
| Figura 25: Etapas do processo de preparação das pranchas de cortiça natural. CP – Calor de processo; RC- resíduos de cortiça. Fonte: Nepomuceno Pereira et al. (2017) .....         | 51 |
| Figura 26: Processo de cozedura das pranchas de cortiça natural. Fonte: <a href="http://www.wineanorak.com">http://www.wineanorak.com</a> .....                                     | 56 |
| Figura 27: Diagrama esquemático do sistema híbrido solar térmico/biomassa proposto. ....  | 57 |
| Figura 28: Principais dados climáticos para o concelho de Évora. Fonte: SolTerm .....   | 59 |
| Figura 29: Colector solar plano da marca Wagner & CO, modelo Euro L20 AR. Fonte: <a href="http://www.wagner-solar.com">www.wagner-solar.com</a> .....                               | 60 |
| Figura 30: Distâncias mínimas entre os colectores para evitar sombreamento. Fonte: <a href="http://www.wagner-solar.com">www.wagner-solar.com</a> .....                             | 64 |
| Figura 31: Temperaturas mensais da água de abastecimento da rede pública de Évora. Fonte: SolTerm .....   | 70 |
| Figura 32: Fracção solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 30 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento .....        | 72 |
| Figura 33: Fracção solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 50 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento .....        | 72 |
| Figura 34: Fracção solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 70 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento .....        | 73 |
| Figura 35: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 30 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento.. | 74 |
| Figura 36: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 50 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento.. | 74 |
| Figura 37: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 70 L/m <sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento.. | 75 |
| Figura 38: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 60°C e diferentes volumes específicos .....                       | 76 |
| Figura 39: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 80°C e diferentes volumes específicos .....                       | 76 |
| Figura 40: Fracção solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 99°C e diferentes volumes específicos .....                       | 77 |



## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Potência térmica instalada em termos mundiais de sistemas para geração de calor de processo na indústria entre 2006 e 2018, e respectiva área instalada de colectores solares. Fonte: Sharma et al. (2017), IEA/ SHC Programme (2013) e <a href="http://ship-plants.info/">http://ship-plants.info/</a> ..... | 7  |
| Tabela 2: Custos específicos de investimento das diferentes tecnologias de energia solar térmica para instalações industriais que utilizam sistemas de energia solar térmica na Europa.....   | 39 |
| Tabela 3: Custos específicos de investimento inicial para as diferentes tecnologias de energia solar térmica.....   | 40 |
| Tabela 4: Custos específicos de operação e manutenção das diferentes tecnologias de energia solar térmica.....  | 41 |
| Tabela 5: Principais características e respectivos valores de referência do modelo L20 AR.....  | 60 |
| Tabela 6: Número mínimo de colectores a ser instalado em função do volume específico .....  | 62 |
| Tabela 7: Número de colectores que foram analisados para cada um dos volumes específicos .....  | 63 |
| Tabela 8: Distâncias mínimas entre colectores de forma a evitar sombreamentos. ....   | 65 |
| Tabela 9: Valores de espessura de isolamento das tubagens, em função do seu diâmetro. Fonte: Lebeña e Costa (2006).....   | 69 |
| Tabela 10: Carga térmica energética do sistema solar térmico em função da temperatura de fornecimento .....   | 70 |
| Tabela 11: Resultados da análise para um incentivo nulo e incentivo que faz com que o VAI tenha valor nulo no investimento inicial do sistema solar .....   | 86 |
| Tabela 12: Resultados da análise para um incentivo igual a 25% do investimento inicial do sistema solar .....   | 87 |
| Tabela 13: Resultados da análise para um incentivo igual a 50% do investimento inicial do sistema solar .....   | 87 |
| Tabela 14: Resultados da análise para um incentivo igual a 75% do investimento inicial do sistema solar .....   | 87 |
| Tabela 15: Resultados da análise para um incentivo igual a 100% do investimento inicial do sistema solar .....  | 88 |

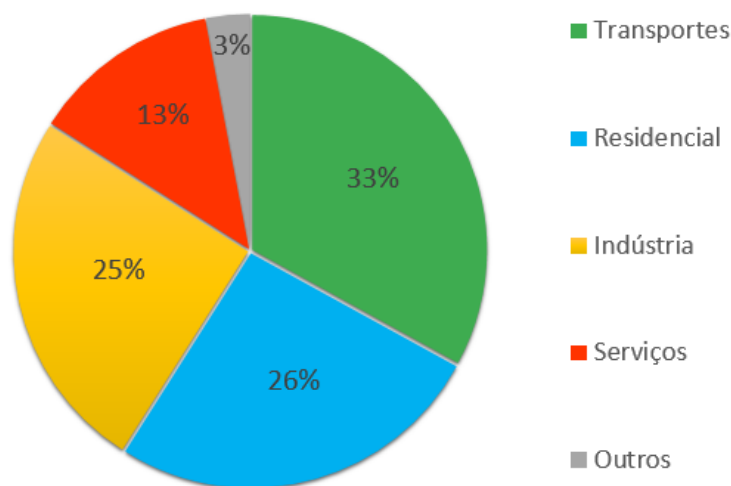




## 1. Introdução

### 1.1. Contextualização

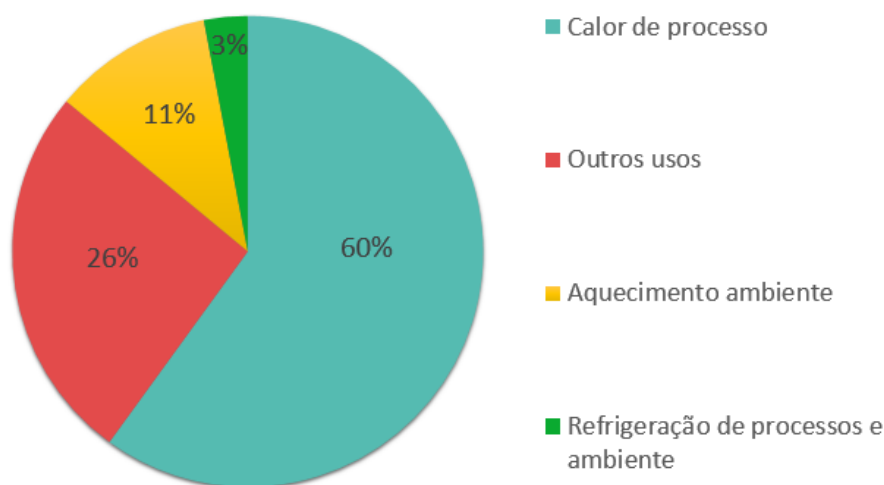
A quota de cada sector no consumo de energia final, para o ano de 2016, nos 28 países pertencentes à União Europeia (UE28), pode ser vista no gráfico da figura 1 (Eurostat, 2018).



**Figura 1: Contribuição dos diversos sectores no consumo de energia final para os países da UE28, para o ano de 2016. Fonte: Eurostat (2018)**

O que se pode observar da figura anterior é que o sector industrial consumiu em 2016 um quarto da energia final nos países pertencentes à União Europeia, sendo o terceiro sector mais consumidor de energia, logo a seguir ao dos transportes e ao residencial. Pode-se concluir então que o sector industrial possui um papel bastante significativo e com grande relevância no que toca ao consumo de energia final nos países pertencentes à União Europeia.

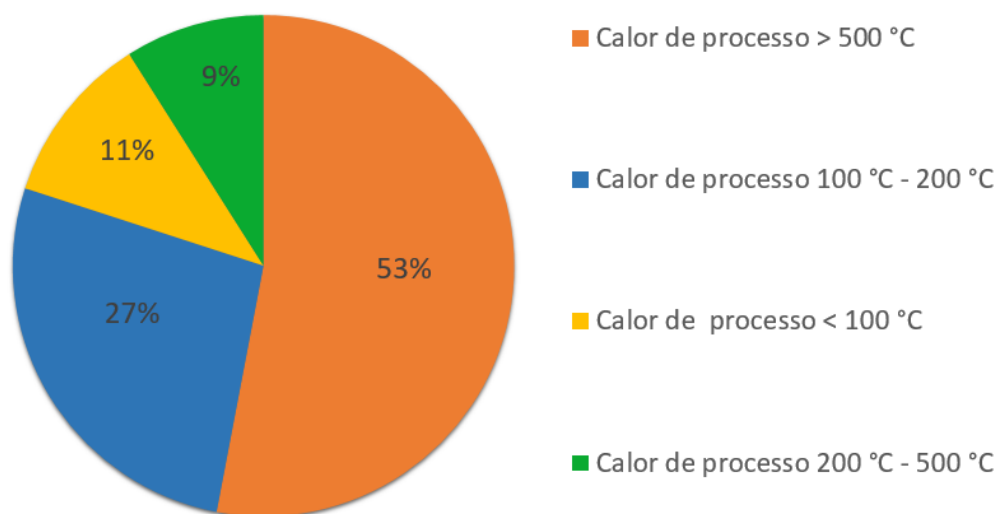
Do consumo energético na indústria para os países pertencentes à União Europeia, para o ano de 2012, mais de metade (60%) refere-se a necessidades de calor de processo, como se pode observar na figura 2 (Fraunhofer et al., 2016).



**Figura 2: Contribuição das diferentes utilizações no consumo de energia final na indústria para os países da UE28, para o ano de 2012. Fonte: Fraunhofer et al. (2016)**

Os diferentes sectores industriais possuem processos produtivos muito distintos, com consumos energéticos muito diferentes entre si e que utilizam fontes energéticas e tecnologias de conversão energética também muito distintas entre si. Para além disto, relativamente ao consumo de calor de processo, a indústria apresenta uma grande diversidade nas temperaturas de operação e meios térmicos utilizados nos processos produtivos. O potencial de introdução de um sistema de produção de calor depende, primeiramente, da capacidade que o sistema tem em satisfazer os requisitos mínimos exigidos pelo processo. Os sistemas solares térmicos são mais adequados e poderão fornecer energia em processos industriais que necessitem de temperaturas baixas (até aos 100 °C) ou médias (entre os 100 °C e os 250 °C). Importa então perceber, dentro das necessidades de calor de processo que a indústria possui, quais as temperaturas requeridas nos processos, para perceber se os sistemas solares térmicos possuem potencial para serem introduzidos. A contribuição dos diferentes requisitos de temperatura pode ser observada na figura 3.

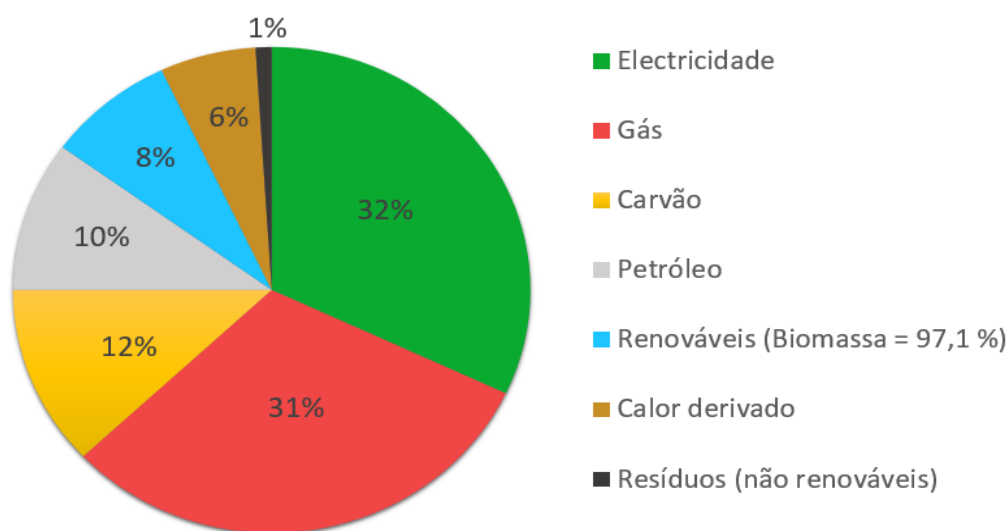




**Figura 3: Contribuição dos requisitos em termos de temperatura das necessidades de calor de processo para a indústria nos países da UE28, para o ano de 2012. Fonte: Fraunhofer et al. (2016)**

O que se pode concluir observando a figura anterior é que, por um lado, mais de metade das necessidades de calor de processo na indústria está associada a temperaturas muito elevadas ( $> 500\text{ °C}$ ), e para processos com estes valores de temperaturas o solar térmico torna-se inviável. Por outro lado, as necessidades de calor de processo para temperaturas entre os  $100\text{ °C}$  e os  $200\text{ °C}$  e para temperaturas abaixo dos  $100\text{ °C}$  perfazem juntas uma percentagem de utilização de 38%, que é um valor bastante significativo e que mostra que pode haver potencial para a introdução do solar térmico para produção de calor no sector industrial.

Importa igualmente saber quais as diferentes fontes energéticas utilizadas no consumo final de energia no sector da indústria. A contribuição de cada fonte nesse consumo, para a UE28 no ano de 2016, pode ser vista na figura 4.



**Figura 4: Contribuição de cada fonte energética no consumo de energia final no sector da indústria para a UE28, no ano de 2016. Fonte: Eurostat (2018)**

Da figura anterior pode-se concluir que os combustíveis fósseis são a principal fonte energética no consumo de energia final no sector da indústria para os países pertencentes à UE28, representando o gás, o carvão e o petróleo uma contribuição de 53%. A eletricidade também possui um peso bastante significativo neste consumo, e sabendo que uma parte significativa das fontes energéticas necessárias para obter eletricidade provêm dos combustíveis fósseis (em 2017 a energia elétrica com base em fontes renováveis para os países da UE28 foi de apenas 30,7%), o peso que estes possuem no consumo de energia final é ainda mais significativo (Eurostat, 2018). Uma grande parte dos países pertencentes à UE28 é deficitária na produção primária de combustíveis fósseis. Estes, não possuindo reservas próprias de combustíveis fósseis, ficam dependentes da flutuação do seu preço de venda, e a tendência será estes combustíveis terem preços de venda cada vez mais elevados no futuro. Aproveitar as energias renováveis para atender às necessidades energéticas destes países reveste-se de uma enorme importância, não só em termos económicos como ambientais, pois existe actualmente uma necessidade premente de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A utilização de sistemas de energias renováveis como a biomassa, que pode satisfazer necessidades de calor de processo para qualquer gama de temperaturas, ou a energia solar térmica para processos que exigem calor a baixas e médias temperaturas, são soluções que devem ser tomadas em conta.



As energias renováveis apresentam um potencial de crescimento considerável em termos de contribuição como fonte energética no sector da indústria mundial até 2050. Este tipo de fonte energética possuía no ano de 2007 uma contribuição mundial de aproximadamente 10 EJ/ano (cerca de 8% de contribuição no consumo de energia final no sector da indústria), sendo que o potencial estimado é de, em 2050, ser praticamente 50 EJ/ano a nível mundial (cerca de 21% de contribuição no consumo mundial de energia final no sector da indústria). Dos cerca de 50 EJ/ano previstos para 2050, cerca de 37 EJ/ano proviriam da biomassa e mais de 10 EJ/ano seriam provenientes de sistemas solares térmicos e de bombas de calor. Este aumento da utilização das energias renováveis no sector industrial tem o potencial para contribuir com cerca de 10% na redução das emissões de GEE expectáveis até 2050. Isto representaria cerca de 2 Gt de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas anualmente, representando também cerca de 25 % do total esperado de redução de emissão de GEE no sector industrial até 2050 (Taibi et al., 2012).

A energia proveniente da biomassa domina a totalidade da utilização actual das energias renováveis no sector industrial a nível mundial, em grande parte na indústria do processamento de madeira e nas indústrias da celulose e da pasta de papel. É também referido que existem quantidades significativas de bioenergia que são utilizadas nas indústrias dos países em desenvolvimento, e que muitas vezes acabam por não ser devidamente contabilizadas, resultando em incertezas consideráveis nas estatísticas de utilização de energias renováveis no sector industrial (Taibi et al., 2012). Através do gráfico da figura 4 pode-se constatar que a biomassa foi a única energia renovável utilizada no consumo de energia final no sector industrial dos países da UE28 em 2016 (do total de 8% de utilização de energias renováveis no sector industrial 97,1% foram referentes à utilização de biomassa).

O custo da implementação de sistemas de energias renováveis é apontado em (Taibi et al., 2012). como o grande entrave à sua utilização de forma mais generalizada no sector industrial. No que toca especificamente à biomassa, uma das grandes restrições a uma maior penetração, no sector industrial, deste recurso como fonte energética é a sua disponibilidade local, o que afecta directamente a competitividade económica da





biomassa. O preço do transporte da biomassa para zonas que são escassas neste tipo de recurso é apontado como um factor dissuasor à sua utilização energética para muitas empresas do sector industrial. A superação desta barreira através do desenvolvimento de mercados internacionais de biomassa estará dependente do surgimento de um sector eficaz que possa transformar a biomassa num produto energético moderno em vez de uma fonte energética adquirida localmente. Para além disto, a utilização da biomassa para fins energéticos compete directamente com a sua utilização por parte das indústrias florestais, potenciando a escassez do recurso. Devem ser por isso elaborados cenários/estudos para uma utilização cada vez mais optimizada deste tipo de recurso.

Um factor que poderá beneficiar o uso da biomassa pela indústria poderá passar pela possível introdução de taxas associadas à emissão de GEE, sobretudo quando esta compete directamente, por exemplo, com o carvão como fonte energética. O carvão é neste caso dado como exemplo porque tem um custo reduzido e é a segunda fonte energética de origem fóssil mais utilizada na indústria da UE28 (figura 4). Para além disso o carvão é facilmente substituído pela biomassa, pois a combustão destas duas matérias-primas pode ser realizada na mesma caldeira. A biomassa, através de tecnologias de pré-processamento, será assim a única opção a curto prazo para uma substituição progressiva do carvão sem substituição dos equipamentos existentes para a biomassa, especialmente em sectores onde o teor de carbono da fonte energética utilizada é fundamental para o processo industrial, como a indústria do aço ou dos produtos químicos e petroquímicos (Taibi et al., 2012).

Como já foi constatado, a utilização de sistemas de energia solar térmica para aquecimento de processos industriais fica bastante aquém do seu elevado potencial. Este potencial, para os países da União Europeia, foi estimado em cerca de 260 PJ anuais, com uma área de colectores correspondente entre os 143 e os 180 milhões de m<sup>2</sup> (Sharma et al., 2017). A nível mundial o potencial de utilização da energia solar térmica para aquecimento de processos industriais foi estimado em 5,6 EJ/ano até 2050, sendo que metade deste valor está projectado para ser utilizado na indústria alimentar (Taibi et al., 2012).



A plataforma *SHIP Plants: Database for applications of solar heat integration in solar processes*, que pode ser visitada no portal <http://ship-plants.info/>, onde existe uma base de dados online, contém informação geral e mundial sobre diferentes instalações solares térmicas existentes, que fornecem energia térmica para processos de produção para diferentes sectores da indústria. Através dos dados disponíveis na *SHIP* pode-se concluir que no final de 2018 existiam 308 sistemas solares térmicos em operação no mundo para geração de calor de processo na indústria. Estes sistemas possuem uma potência térmica instalada de cerca de 240 MW<sub>t</sub>, equivalendo a um total de cerca de 425 000 m<sup>2</sup> de colectores solares instalados. Como os sistemas solares térmicos instalados para geração de calor de processo na indústria, em termos mundiais, estão muito aquém do seu potencial estimado apenas para os países da UE28, pode-se concluir que existe uma enorme discrepância entre o potencial de aplicação de sistemas solares térmicos no sector industrial e a sua utilização real por parte da indústria.

A evolução, em termos mundiais, entre 2006 e 2018, da potência térmica instalada e da respectiva área de colectores para gerar calor de processo através da energia solar no sector da indústria pode ser observada na tabela 1.

**Tabela 1: Potência térmica instalada em termos mundiais de sistemas para geração de calor de processo na indústria entre 2006 e 2018, e respectiva área instalada de colectores solares.**

Fonte: Sharma et al. (2017), IEA/ SHC Programme (2013) e <http://ship-plants.info/>

| Ano  | Potência térmica instalada (MW <sub>t</sub> ) | Área de colectores solares (m <sup>2</sup> ) |
|------|---|--|
| 2006 | 25  | 35 000                                       |
| 2008 | 27  | 38 500                                       |
| 2010 | 42  | 60 000                                       |
| 2013 | 88  | 125 000                                      |
| 2014 | 93  | 136 000                                      |
| 2015 | 100   | 140 600                                      |
| 2018 | 240   | 425 000                                      |





Da tabela 1 pode-se concluir que a potência térmica instalada de colectores mais do que duplicou entre 2015 e 2018 e a área de colectores solares mais do que triplicou durante o mesmo período de tempo. Este grande aumento tanto na capacidade instalada como na área de colectores instalados foi impulsionado pela construção, em 2017, de uma central solar térmica com a tecnologia de colectores solares cilindro-parabólicos em Omã, que possui uma área de colectores de 210 000 m<sup>2</sup> e uma potência térmica instalada de 100 MWt. Uma grande parte dos 308 sistemas solares referidos anteriormente são actualmente de natureza experimental e de relativamente pequena escala, sendo que apenas 35 possuem uma área de colectores superior a 1000 m<sup>2</sup>. Dentro do total dos sistemas solares operacionais cerca de 52 % são baseados em tecnologias de colectores solares planos (CSP), 19 % de colectores solares concentradores cilindro-parabólicos (CCP), 15 % de colectores solares de tubos de vácuo (CTV), 4% de colectores solares Concentradores Lineares de Fresnel (CCF) e 10% são de outro tipo de colectores ou de vários tipos de colectores diferentes instalados na mesma central. De referir que apenas 112 dos 308 sistemas solares térmicos que estão na plataforma *SHIP* apresentam valores reais de potência térmica instalada. Em todos os outros sistemas a potência térmica é calculada, segundo a plataforma *SHIP*, multiplicando a área instalada de colectores por 0,7 kWt/m<sup>2</sup>.

Actualmente os colectores para processos a baixas temperaturas, onde se incluem os colectores solares planos e de tubos de vácuo, são tecnologias com um grau de maturidade elevado, estando comercialmente disponíveis e bem estabelecidas. Os processos industriais a baixas temperaturas ocupam hoje mais de 90% da capacidade instalada no que toca a aplicações de energia solar térmica no sector da indústria para produção de calor de processo (Horta, 2015). No que toca à aplicação do solar térmico para a produção de calor aplicado às médias e altas temperaturas, através de tecnologias de concentração solar, esta possui um forte potencial de crescimento. Estima-se que a percentagem de utilização de tecnologias de concentração solar tende a crescer a médio/longo prazo. (Horta, 2015). A principal barreira à implementação de sistemas solares térmicos por parte do sector industrial é o custo inicial relativamente elevado para a instalação deste tipo de sistemas, particularmente para pequenas e médias empresas. A falta de opções compactas de armazenamento térmico, bem como a inexistência actual de políticas de apoio adequadas para



a adopção deste tipo de sistemas, acabam por ser também um forte entrave (Sharma et al., 2017).

É necessário existir então algum tipo de incentivo para que a indústria equacione a utilização de sistemas de energia solar térmica. Uma maneira de fomentar a sua utilização por parte das empresas poderá passar pelos incentivos capitais directos ao investimento, através, por exemplo, de participações do Estado ou de outras entidades (ver capítulo 5.3). A longo prazo também é expectável que haja uma redução gradual dos custos económicos associados à instalação e à operação e manutenção de sistemas de energias renováveis, nomeadamente de sistemas solares térmicos, ao mesmo tempo que também é expectável um aumento gradual dos custos associados aos combustíveis fósseis. Este poderá ser também um factor para a instalação de novos sistemas por parte das empresas do sector industrial. Outro possível factor poderá passar pelo marketing, pois poderá ser uma estratégia a ser adoptada por parte das empresas terem a sua imagem associada a políticas energéticas com menor impacto ambiental e que ajudem a reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

No que concerne à introdução e utilização de sistemas de energia solar térmica por parte da indústria em Portugal verifica-se que na plataforma *SHIP* apenas estão registados três projectos, sendo que dois estão aplicados em fábricas do sector alimentar (Simoa S.A. e Knorr Best Foods S.A.) e o outro no sector metalúrgico (Silampos S.A.). No projecto da empresa Simoa S.A., cujo objectivo da utilização de sistemas de energia solar térmica é o de aquecimento de ar de processo, são utilizados colectores solares planos, com uma área instalada de colectores de  $670 \text{ m}^2$  e com uma potência térmica instalada de  $469 \text{ kW}_t$ , de forma a atingir uma temperatura de  $30^\circ\text{C}$ . No projecto da empresa Knorr Best Foods S.A., cujo objectivo da utilização de sistemas de energia solar térmica é o de aquecimento de água para lavagem de utensílios, são também utilizados colectores solares planos com uma área instalada de colectores de  $440 \text{ m}^2$  e com uma potência térmica instalada de  $308 \text{ kW}_t$ , de forma a atingir temperaturas entre os  $40^\circ\text{C}$  e os  $45^\circ\text{C}$ . Por último, no projecto da empresa Silampos S.A., cujo objectivo da utilização de sistemas de energia solar térmica é o de aquecimento e secagem de produto acabado, são utilizados colectores solares



cilindro-parabólicos, com uma área instalada de colectores de 450 m<sup>2</sup> e com uma potência térmica instalada de 67 kW<sub>t</sub>, de forma a atingir uma temperatura de 50 °C para aquecimento de produto e de 160 °C para secagem de produto.

Na plataforma *SHIP*, a nível mundial, apenas consta um projecto de energia solar térmica aplicada à indústria da cortiça, nomeadamente em Mérida, Espanha. Assim, dada a escassez actual de projectos de energia solar térmica aplicada à indústria da cortiça, e porque esta apresenta processos intensivos em energia térmica, e sendo também o sector da cortiça muito importante na economia portuguesa (ver capítulo 3), este trabalho irá focar-se então na análise da viabilidade tecnoeconómica da introdução de um sistema de energia solar térmica neste tipo de indústria.

## 1.2. Objectivos do trabalho

Esta dissertação pretende estudar a viabilidade tecnoeconómica da introdução de um sistema solar térmico para a geração de calor de processo aplicado à indústria corticeira, nomeadamente para a produção de energia para o processo de cozedura das pranchas de cortiça natural. O sistema solar térmico em análise providencia assim parte da energia necessária para o arranque do processo industrial em questão.

Os objectivos específicos desta dissertação consistem em:

- Estudar uma possível forma de integração do sistema solar no processo, criando um esquema de princípio de integração para tal;
- Definir a tecnologia de geração de energia solar que melhor se adequa às temperaturas necessárias ao processo;
- Fazer o dimensionamento do sistema solar e a sua análise energética, assim como determinar as emissões de gases de efeito de estufa evitadas pela instalação do sistema solar térmico;





- Fazer o estudo da viabilidade económica do sistema;
- Determinar que programas de incentivos económicos por parte das entidades competentes teriam que existir para viabilizar a instalação de um sistema solar térmico para a produção de calor aplicado ao processo de cozedura das pranchas de cortiça natural.

### 1.3. Estrutura da dissertação

Sendo este primeiro capítulo da dissertação referente à introdução e contextualização do trabalho efectuado, no próximo capítulo apresentam-se os sistemas e tecnologias de energia solar térmica que estão disponíveis actualmente, a gama de temperaturas que cada tecnologia é capaz de atingir, assim como o seu estado de maturidade, e os custos dos diferentes tipos de sistemas de energia solar térmica.

No capítulo 3 faz-se uma breve caracterização do sector da cortiça actual, tanto a nível nacional como internacional, assim como dos processos de produção intensivos em calor nesta indústria.

No capítulo 4 é realizado o dimensionamento do sistema proposto, tendo sido apresentado um esquema para a introdução do sistema híbrido solar térmico/biomassa num processo específico da indústria corticeira. É também neste capítulo que são discutidas as melhores opções em termos energéticos/económicos para o sistema solar, sendo realizada a análise energética deste sistema.

No capítulo 5 é realizada a análise de viabilidade económica do sistema híbrido proposto e quais as regras e critérios que melhor avaliam em termos económicos o sistema. São propostos incentivos económicos que poderiam ser concedidos por parte das autoridades competentes, de forma a tornar viável em termos financeiros a aplicação do sistema híbrido proposto.



No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões deste estudo, discutindo algumas limitações encontradas ao longo de todo o processo de elaboração desta dissertação e apresentando as perspectivas futuras de integração de sistemas solares térmicos para a geração de calor de processo na indústria.

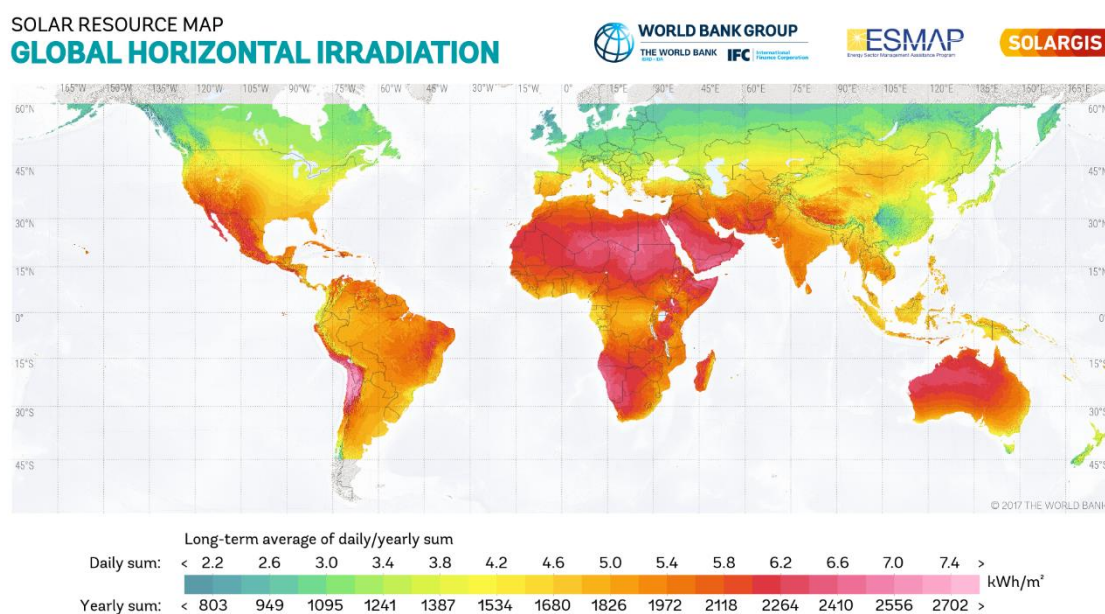




## 2. Sistemas e tecnologias de energia solar térmica

Analisar o potencial de implementação da energia solar térmica na indústria implica quantificar o recurso solar, pois só sabendo a radiação que incide sobre um determinado local é que se determinará se esse é um local apropriado ou não para a instalação de sistemas de energia solar. Quantificar o recurso solar também é imprescindível para se realizar um correcto dimensionamento de um sistema de energia solar.

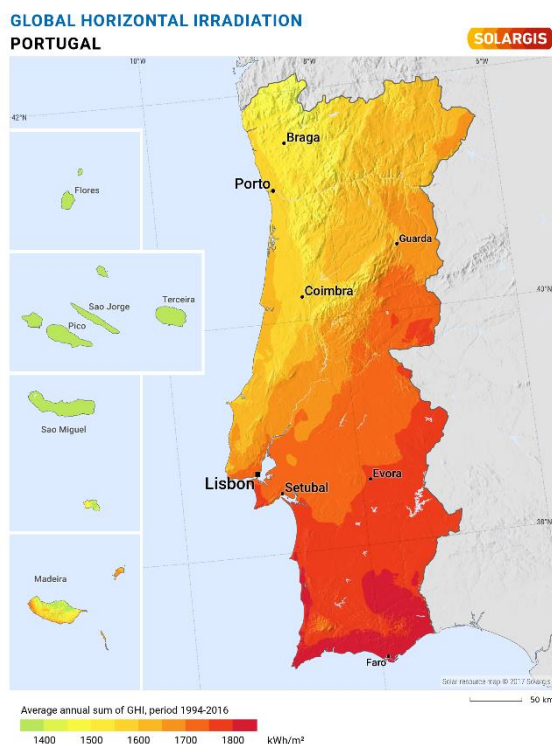
A figura 5 apresenta o mapa da radiação global horizontal, em termos diários e anuais, e na figura podemos observar que Portugal é um dos países europeus com maior disponibilidade de radiação solar. O número médio anual de horas de Sol para o nosso país, entre Janeiro de 2001 e Dezembro de 2018 foi estimado em aproximadamente 3000 horas de sol anuais (<https://www.weatheronline.pt>).



**Figura 5: Mapa mundial da radiação global horizontal, em termos diários e anuais.**

Fonte: <https://solargis.info/>

Na figura 6 pode-se observar o mapa da radiação solar global horizontal para Portugal Continental, em termos anuais, e que mostra que esta varia entre os cerca de 1350 e os 1850 kWh/m<sup>2</sup>. Pode concluir-se então que Portugal é um país com condições bastante vantajosas para a aplicação de sistemas de captação de energia solar.



**Figura 6: Mapa português da radiação global horizontal, em termos anuais.**

**Fonte:** <https://solargis.info>

Os sistemas solares térmicos, como fonte de energia renovável, podem satisfazer uma fracção das necessidades actuais em termos de geração de energia. Em Portugal, e segundo a Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), no ano de 2016, houve uma produção e consumo de energia primária a partir de energia solar térmica de cerca de 84 ktep praticamente toda consumida em solo nacional. Este dado é corroborado pela (APISOLAR, 2015), que confirma que no que toca à produção de energia solar térmica em Portugal, esta é praticamente toda destinada ao mercado nacional. No ano de 2015 foram instalados 46 134 m<sup>2</sup> de sistemas solares térmicos, o que equivaleu a 32,3 MWh de potência instalada. A capacidade acumulada total, no final de 2015, era de cerca de 1 121 104 m<sup>2</sup>, com uma potência instalada total de cerca de 784,8 MW<sub>t</sub>. Em termos energéticos a capacidade acumulada total para o ano de 2015 foi referente ao sector doméstico, sendo que permitiu a produção de 29 861 MWh provenientes de sistemas AQS (águas quentes sanitárias) e 441 MWh provenientes de sistemas combinados (AQS + Aquecimento) (APISOLAR, 2015).



## 2.1. Sistemas de energia solar térmica

Os processos industriais com um consumo contínuo de calor ao longo do ano serão aqueles onde fará mais sentido e onde existem condições mais propícias para a aplicação da energia solar. Assim sendo, processos industriais que exijam consumos de calor de uma forma sazonal, especialmente se forem de Inverno ou Outono, não serão os mais indicados tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista económico para a aplicação de sistemas de energia solar (DGGE, 2004).

Os processos industriais necessitam habitualmente de energia para uma gama de temperaturas elevada, maioritariamente acima dos 500 °C, como se pode comprovar pela figura 3. Os processos onde pode ser utilizada a energia solar estão limitados a valores de temperatura até aos 400 °C, sendo que temperaturas de processo acima deste valor tornam, de uma forma geral, a aplicação do solar térmico inviável, tanto do ponto de vista energético como económico. Tomando como exemplo o gráfico da figura 3, que é referente aos requisitos em termos de temperatura das necessidades de calor de processo para a indústria nos países da UE28, existe ainda uma percentagem significativa (variável entre os 38% e os 47%) das necessidades requeridas do consumo energético onde o solar térmico pode ser inserido. As temperaturas de operação dos sistemas de energia solar térmica podem ser divididas em 3 categorias, consoante a gama de operação: temperaturas operacionais baixas, que serão aquelas abaixo dos 100 °C, até temperaturas operacionais altas, que variam entre os 250 °C e os 400 °C, passando por temperaturas operacionais médias, que variam entre os 100 °C e os 250 °C (Horta, 2015). As temperaturas de operação dos colectores estão directamente relacionadas com as suas perdas térmicas, que se repercutem na eficiência global que estes apresentam. A estratégia para melhorar e otimizar a aplicação do solar térmico na indústria tem que passar sempre por tentar minimizar as perdas de calor a uma gama de temperaturas de operação cada vez mais alta, de maneira a que a eficiência térmica dos colectores seja a mais elevada possível.





No que toca à escolha do sistema de energia solar térmica a ser instalado, para além das especificidades ópticas e térmicas dos colectores, a continuidade da carga de consumo na indústria em causa e o nível de radiação solar na zona onde irão ser instalados os colectores são factores determinantes para essa mesma escolha. O ideal é que a instalação de colectores para uma gama de temperaturas de operação média-alta ou alta só aconteça em regiões com elevados níveis de radiação solar. Nas restantes são aconselhados apenas sistemas para aplicações a baixa ou média-baixa temperatura. Deve-se ter em conta ainda que a temperatura de funcionamento do sistema solar deve ser sempre um pouco superior à temperatura de processo, devido a perdas térmicas no sistema de distribuição de energia. Em sistemas com uma boa concepção esta diferença de temperaturas pode ser inferior aos 10 °C (DGGE, 2004).

Os colectores solares térmicos podem ser utilizados para aquecimento de líquidos, ar ou para produção de vapor, captando a radiação solar e convertendo-a em energia térmica (no subcapítulo 2.3 irá ser descrito de uma forma mais detalhada os diferentes tipos de colectores, explicando-se as principais diferenças entre cada um). No interior do colector circula um fluido próprio (a excepção são os colectores cilindro-parabólicos e os colectores solares concentradores reflectores lineares de Fresnel, em que o fluido circula num tubo cilíndrico localizado no foco dos reflectores), que tanto pode ser óleo térmico como vapor saturado, vapor sobreaquecido, água quente pressurizada ou ar. O fluido será responsável pelo transporte da energia captada até um permutador de calor, dispositivo que permite a transferência da energia térmica de um meio para outro, sendo que esta energia térmica é armazenada posteriormente num depósito de acumulação. Há que realçar que também existem sistemas solares térmicos que não incluem um permutador de calor, embora as regras das boas práticas aconselhem o seu uso, ou que não incluem um depósito acumulador. Os sistemas solares térmicos sem depósito acumulador são mais utilizados quando existe recirculação da água no circuito secundário do sistema, por exemplo para fornecer calor para processos industriais e para aquecimento ambiente ou de piscinas (Aguiar e Coelho, 2012).

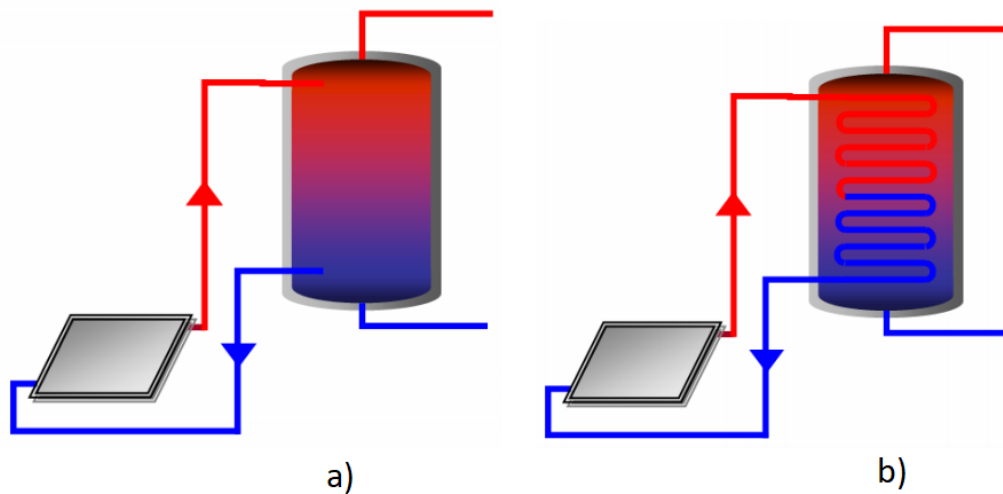


A circulação do fluido pode ser realizada através da utilização de uma bomba circuladora (circulação forçada) ou por circulação natural, que tem por base a diferença de densidades entre a água quente e fria, e que se designa de uma forma comum por circulação por termossifão. Destes dois conceitos podem agrupar-se os sistemas de energia solar térmica quanto à tipologia da circulação do fluido: sistemas solares por circulação forçada e sistemas solares por termossifão. Estes últimos são uma solução mais económica e de instalação mais simples comparativamente aos sistemas solares por circulação forçada, e ideal para espaços mais reduzidos. Este tipo de sistema implica a colocação do depósito acima dos colectores, com um desnível de cerca de 30 cm entre eles. Tanto os sistemas por circulação forçada como por termossifão são instalados de forma a combater o risco de circulação inversa. Este fenómeno acontece quando, por exemplo num período nocturno, o fluido no colector arrefece, tornando-se mais denso e retrocedendo para o depósito, o fluido térmico dentro deste é forçado a ir para os colectores, dissipando o calor do depósito.

A ligação e transferência de energia entre os colectores solares e o depósito, nos sistemas em que este existe, é efectuada através de um circuito hidráulico, que como pode ser visto na figura 7, pode ter uma de duas das seguintes configurações:

- Circuito sem permutador de calor: o fluido circula directamente dos colectores para o depósito, sendo esse fluido água quente pressurizada. Este tipo de circuito encontra-se em desuso, pois acarreta alguns problemas de corrosão e calcificação das tubagens.
- Circuito com permutador de calor: o fluido térmico circula dos colectores para o depósito em circuito fechado e com permutação térmica para o circuito secundário, que também pode ser designado por circuito de consumo, através de um permutador de calor, que tanto pode ser interior ou exterior ao depósito.





**Figura 7: Circuito hidráulico que liga e faz a transferência de energia entre os colectores e o depósito, sendo a) um circuito sem permutador de calor e b) um circuito com permutador de calor.**

Fonte: <http://www.cienciaviva.pt>

Importa referir que os depósitos acumuladores deverão dispor-se em posição vertical, de forma a favorecer a estratificação térmica da água. Isto aumenta o desempenho do sistema solar, pois o rendimento dos colectores aumenta se a temperatura de entrada baixar, diminuindo assim as perdas térmicas. A verticalidade dos depósitos de armazenamento traz também vantagens relativamente ao custo do sistema, pois os depósitos numa posição vertical ocupam um espaço em área mais reduzido comparativamente aos depósitos numa posição horizontal. Relativamente à escolha do material dos depósitos acumuladores há que ter em consideração factores como a corrosão, a pressão e a temperatura no interior dos depósitos, sendo que o aço inoxidável é o tipo de material mais comumente utilizado para revestir depósitos acumuladores. Há que ter em consideração que exteriormente também se devem revestir os depósitos com uma pintura anticorrosiva, que aumenta a sua protecção, e, portanto, prolonga a sua vida útil (Lebeña e Costa, 2006).

No que toca aos permutadores de calor é preciso também ter em atenção que existem dois conceitos, que embora pareçam semelhantes, são distintos entre si: rendimento de um permutador e eficácia de um permutador. O rendimento de um permutador é a relação entre a energia fornecida e a energia recebida por estes, e que com um permutador bem isolado as perdas são da ordem dos 5% (Lebeña e Costa, 2006). A eficácia de um permutador é a razão entre a energia permutada e a máxima que teoricamente poderia



permutar, se a área de permuta fosse muito grande. Quanto menor for a eficácia de um permutador, maior será a temperatura com que o fluido retorna aos colectores, diminuindo o rendimento deste e da instalação (por outro lado, quanto maior for a eficácia do permutador maior será o seu custo, portanto não compensa ir além do valor recomendado) (Lebeña e Costa, 2006). Importa também referir que apesar da utilização dos permutadores de calor implicarem um investimento financeiro superior, a sua utilização actualmente está generalizada, pois o evitar do aparecimento de corrosão e de depósitos de calcário nas tubagens do circuito compensa claramente esse investimento.

As eficácias típicas dos diversos tipos de permutadores são as seguintes (Lebeña e Costa, 2006):

- Permutador de camisa - Eficácia = 35 %
- Permutador de serpentina - Eficácia = 55 %
- Permutador de placas - Eficácia = 75 %

Como de uma maneira geral os volumes de depósitos para sistemas solares térmicos são superiores a 3000 litros em aplicações não domésticas, os permutadores de placas acabam por ser normalmente os mais utilizados. Estes possuem as seguintes vantagens, comparativamente aos outros dois:

- Alta qualidade do material, que garante um tempo de vida elevado, assim como uma elevada rentabilidade;
- São moduláveis, o que permite por consequência um aumento do número de placas sem constrangimentos;
- Fácil manutenção, sendo desmontáveis e de fácil limpeza;
- Possuem uma excelente eficácia, devido ao seu funcionamento em contracorrente, permitindo assim uma elevada potência de permuta, mesmo que sejam de tamanho pequeno.



Este trabalho, como já foi referido anteriormente, centra-se na viabilidade tecnoeconómica da aplicação de sistemas de energia solar térmica na indústria da cortiça. Em contexto industrial é necessário os sistemas de energia solar possuírem um sistema complementar, dado que a energia solar não consegue garantir por si só a satisfação das necessidades de calor. Assim, um sistema complementar garante uma alimentação contínua de energia, prevenindo falhas energéticas que possam ocorrer em sistemas que recorrem a energia solar, complementando ou substituindo assim estes sistemas de energia solar sempre que necessário. Quanto maior for a fracção solar, definida como a percentagem de energia fornecida pelo sistema solar para satisfazer as necessidades de aquecimento, menor vai ser a necessidade energética do sistema complementar, sendo por isso essencial saber a quantidade de energia que o sistema solar fornece.

Outro aspecto importante no que se refere à concepção de sistemas baseados em energia solar térmica é o do armazenamento de energia. Com as oscilações na taxa de produção energética, dado que a intensidade da irradiação solar é variável, e pelo facto de não haver produção energética em período nocturno, é recomendável o armazenamento da energia gerada pelos colectores. Desta maneira a energia armazenada pelos depósitos pode ser consumida sempre que é necessária e pretendida, sendo também possível manter constante o fornecimento de energia solar térmica, alargando assim o período de operação do sistema se tal for requerido. No armazenamento energético sob a forma de calor poderemos considerar dois tipos distintos de armazenamento: térmico e termoquímico (Mendes et al., 2010).

Dentro do armazenamento térmico existe um armazenamento de energia na forma de calor sensível ou na forma de calor latente, enquanto que no caso do armazenamento termoquímico podemos considerar os sistemas que envolvam processos de adsorção ou reacções químicas.

Os sistemas de armazenamento de calor sensível usam a capacidade calorífica de um meio líquido ou sólido e a alteração da sua temperatura no decorrer do processo de carga e descarga. A quantidade de calor armazenado pelo sistema depende do calor específico do





meio, da temperatura e da quantidade de material de armazenamento. Os sistemas de armazenamento de calor latente assentam sobre o calor absorvido ou libertado quando um material de armazenamento sofre uma mudança de fase, seja de sólido para líquido ou de líquido para gasoso. Um exemplo de um sistema de armazenamento de calor latente são os materiais de mudança de fase (“Phase Change Materials”, PCMs), que se tratam de materiais com um elevado calor de fusão que, derretendo e solidificando a uma determinada temperatura, são capazes de armazenar e libertar grandes quantidades de energia. O calor é absorvido ou libertado quando o material muda de sólido para líquido ou de líquido para sólido (Mendes et al., 2010).

Os sistemas de armazenamento termoquímico, por seu turno, têm como base a energia absorvida e libertada na quebra e formação de ligações moleculares em reacções químicas reversíveis. Neste tipo de sistemas o calor armazenado depende tanto do material de armazenamento como do calor gerado pela reacção e do grau de conversão desta. É de referir que a utilização de armazenamento termoquímico de energia ainda está numa fase muito inicial para ser aplicado em sistemas de energia solar. Este tipo de armazenamento tem sido objecto de estudo para que no futuro a sua utilização possa ser uma realidade, dadas as enormes vantagens que este possui, tais como densidades de armazenamento elevadas e o facto deste tipo de armazenamento abranger uma larga gama de temperaturas (30 °C - 1000 °C) (Mendes et al., 2010).

Um outro ponto essencial na concepção de sistemas de energia solar térmica aplicado à geração de calor de processo é a integração deste tipo de sistemas. Comparado com as aplicações domésticas, não existem soluções *standard* e generalizadas no que concerne à aplicação de sistemas de energia solar térmica na indústria. As características do processo térmico são determinantes para a definição da integração do sistema solar. O processo pode ser aquecido com um permutador de calor interno ou externo, através de aquecimento elétrico ou com injeção direta de vapor, sendo que a integração do sistema solar térmico pode ser desde relativamente simples a altamente complexa. Por consequência, surgem conceitos diferentes para a integração de sistemas solar térmicos na indústria. De uma maneira geral pode-se dividir o nível de integração em dois níveis





diferentes: nível de fornecimento e nível de processo (Helmke e Hess, 2015; Schmitt et al., 2017).

No que respeita ao nível de fornecimento a integração de sistemas de energia solar térmica difere de acordo com o meio de transferência de calor utilizado. Este meio de transferência de calor tanto pode ser gás, como líquido (água quente, fluido sintético ou óleo térmico) ou vapor. Se o meio de transferência de calor for líquido, a utilização dos diferentes tipos de meios líquidos apenas fará com que haja diferentes tipos de permutadores de calor necessários consoante esse meio líquido utilizado. Se o meio de transferência for o vapor, três conceitos de integração são possíveis: “geração de vapor, “aquecimento da água de alimentação da caldeira” e “aquecimento da água de reposição”, e estes três conceitos diferentes são de integração paralela (Helmke e Hess, 2015).

No nível de processo existe uma primeira distinção que é feita pela forma como a energia irá ser consumida, e podem ser atribuídas 3 categorias em função do consumo de energia: “pré-aquecimento”, aquecimento e manutenção da temperatura” e “processos de separação térmica”. Na categoria “pré-aquecimento” podem ser utilizados permutadores de calor externos e injeção directa de vapor, na categoria “aquecimento e manutenção da temperatura” podem ser utilizados permutadores de calor externos e internos e injeção directa de vapor, e por último, na categoria “processos de separação térmica”, podem ser utilizados secadores convectivos, secadores de contacto e evaporadores (Helmke e Hess, 2015).

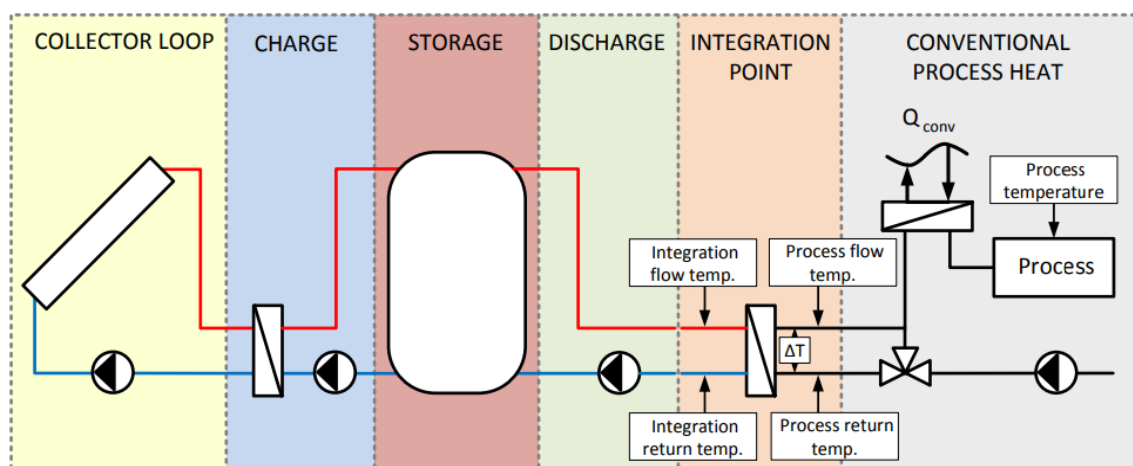
É muito importante também distinguir entre dois tipos de temperaturas de integração diferentes, a temperatura de retorno da integração e a temperatura de fornecimento da integração, já que estas temperaturas são muito importantes na concepção de sistemas solares térmicos para geração de calor de processo na indústria.

A temperatura de retorno da integração pode ser definida como a temperatura de retorno do ponto de integração para o sistema solar térmico, e pode ser mantida constante ou ser variável (Helmke e Hess, 2015). É também importante referir que o potencial da energia



solar atingir rendimentos superiores é tanto maior quanto menor for o valor da temperatura de retorno de integração, uma vez que se as temperaturas de retorno de integração forem baixas isto irá fazer com que as temperaturas de entrada dos colectores também sejam baixas, e como consequência, verificar-se-á uma eficiência superior do sistema de colectores. A temperatura de fornecimento da integração pode ser definida como a temperatura que provém dos colectores ou do depósito no ponto de integração.

As figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, os diferentes componentes de um sistema solar típico para pré-aquecimento e aquecimento de um processo industrial através de um meio líquido, como por exemplo a água. No caso do sistema solar térmico para pré-aquecimento de um processo industrial, a temperatura de retorno da integração varia de acordo com a temperatura de fornecimento de integração, ou seja com a energia fornecida pelos colectores, e é especificado um valor máximo de temperatura de fornecimento de integração. A geração de calor de processo através do sistema complementar é desligada sempre que este valor de temperatura máxima de fornecimento de integração pode ser fornecido.

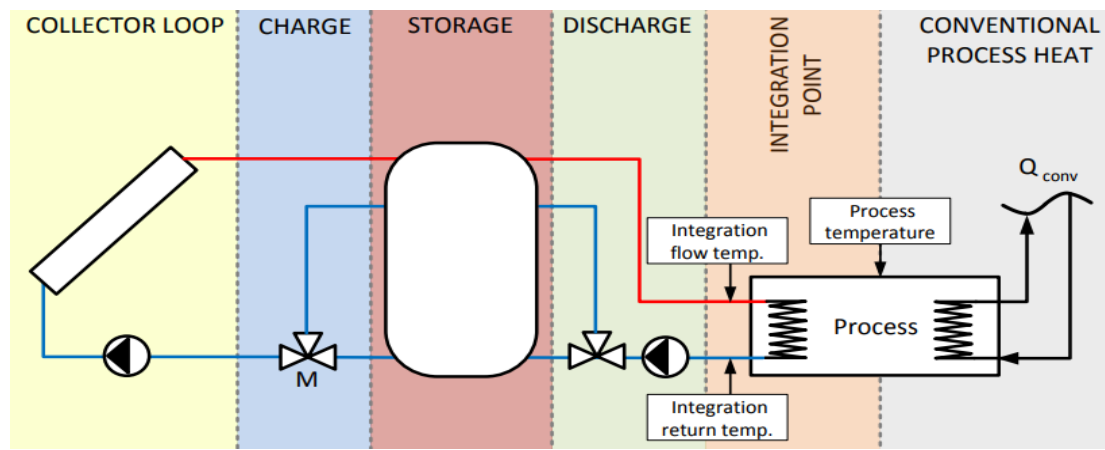


**Figura 8: Sistema solar térmico para pré-aquecimento de um processo industrial.**

**Fonte: Helmke e Hess (2015)**

Para um sistema de aquecimento solar, a temperatura de fornecimento de integração será definida juntamente com um intervalo de tolerância de temperatura que será especificado, e o sistema solar térmico não fornecerá calor para um valor de temperatura abaixo deste

intervalo especificado. A geração de calor de processo através do sistema complementar só será desligada nos momentos em que o sistema solar térmico fornecer de uma forma constante a potência de aquecimento necessária o processo em causa. Neste tipo de sistemas a temperatura do processo tem um impacto directo na temperatura de retorno da integração e na temperatura de fornecimento da integração.



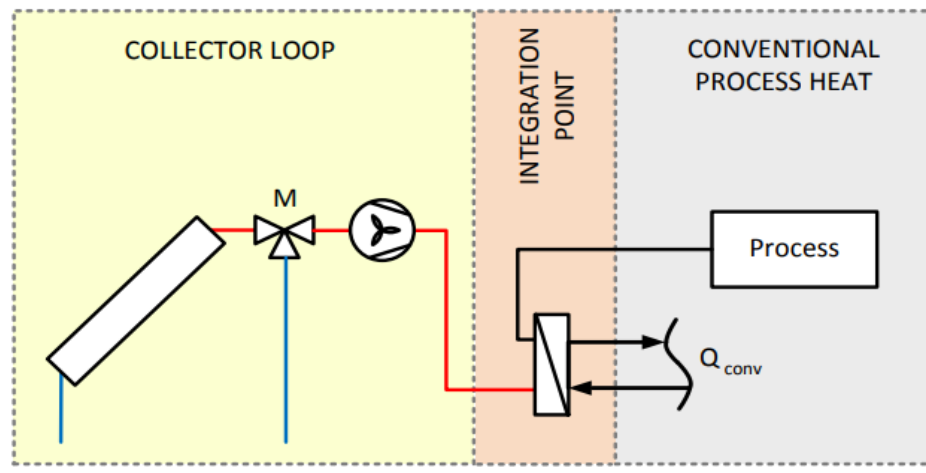
**Figura 9: Sistema solar térmico para aquecimento de um processo industrial.**

Fonte: Helmke e Hess (2015)

O sistema solar térmico poderá também aquecer ou pré-aquecer ar. Um exemplo de um *layout* deste tipo de sistema pode ser observado na figura 10. Neste sistema o ar é aquecido ou pré-aquecido directamente dentro de um colector de ar<sup>1</sup>, e pode ser adicionado ou misturado ar à temperatura ambiente, de forma a poder controlar a temperatura do ar de entrada no processo. O ar fornecido pelo sistema de colectores pode também, se necessário, ser aquecido pela fonte de calor convencional. Este tipo de sistema solar térmico pode ser utilizado para processos que necessitem de secagem ou para pré-aquecimento de ar que será posteriormente utilizado em processos que necessitem de combustão.

<sup>1</sup> Um colector de ar trata-se de um colector solar plano usado principalmente para aquecimento de espaços e para aplicações em secadores. Neste tipo de colectores o ar flui através do colector por convecção natural ou quando forçado por um ventilador.





**Figura 10: Sistema solar térmico para pré-aquecimento ou aquecimento do ar.**  
Fonte: Helmke e Hess (2015)

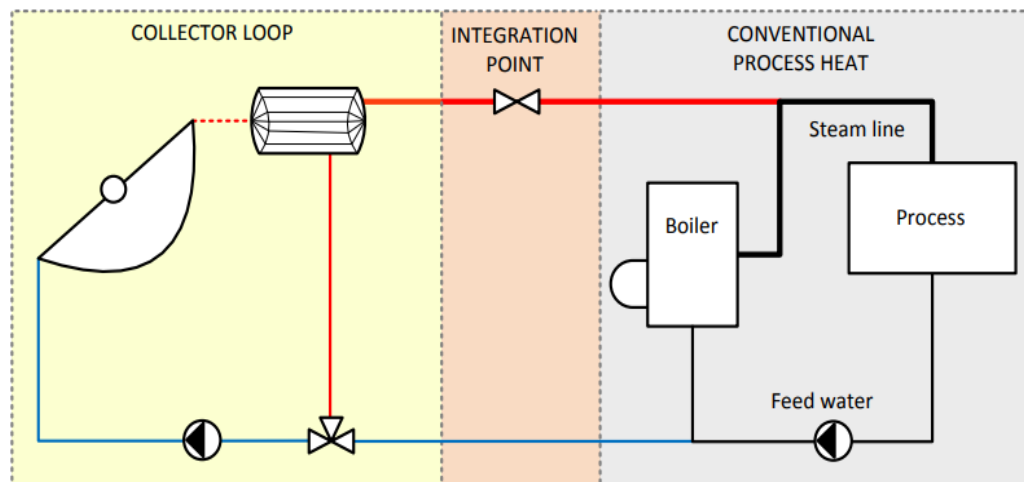
No que toca a sistemas solares de geração de vapor terá de ser utilizada uma tecnologia de colectores solares com concentração que permite atingir temperaturas mais elevadas. Existem duas maneiras distintas de gerar vapor solar: directa e indirecta (Helmke e Hess, 2015; Schmitt, 2017).

Na geração directa de vapor, o meio líquido evapora directamente dentro de tubos absorventes, e a mistura de água e vapor é encaminhada para uma caldeira a vapor. Esta caldeira tem como finalidade separar a mistura de água e vapor em água e vapor saturado, sendo que esta água que sofreu o processo de separação é recirculada novamente para o circuito primário do sistema. O vapor saturado é integrado na rede existente, no ponto de integração, através de uma válvula, quando os valores de temperatura e pressão são suficientes para que este processo de integração ocorra. Este tipo de sistema funciona de uma forma mais eficiente com uma fracção solar baixa, sendo que o armazenamento a vapor também não é comum neste tipo de sistemas devido aos seus custos elevados.

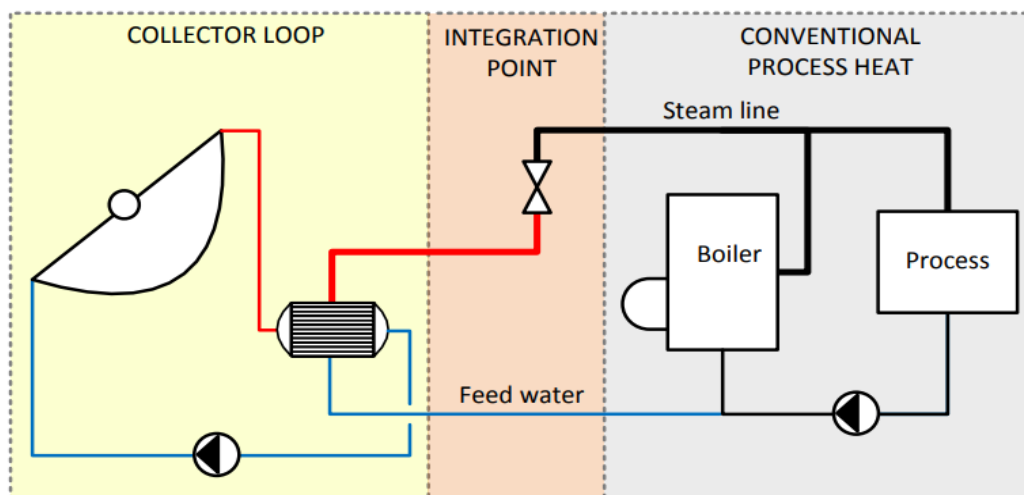
Na geração indirecta de vapor, o meio líquido, geralmente óleo térmico ou água pressurizada, é aquecido nos colectores. Quando o meio líquido é aquecido à temperatura requerida pelos colectores, este é posteriormente transferido para uma caldeira a vapor. Na caldeira a água de alimentação evapora através da adição de calor do meio de



transferência líquido, sendo então injectada na rede existente, através de uma válvula, no ponto de integração.



**Figura 11: Geração directa de vapor solar. Fonte: Helmke e Hess (2015)**



**Figura 12: Geração indirecta de vapor solar. Fonte: Helmke e Hess (2015)**

De uma maneira genérica pode considerar-se que os três parâmetros mais importantes para a integração são a temperatura de processo necessária, o tempo de operação e o custo da integração (Schmitt et al., 2017).



No que toca à temperatura de processo necessária, as aplicações com temperaturas de processo baixas ou processos de pré-aquecimento são de interesse relevante para a integração de sistemas de energia solar térmica na indústria. No que diz respeito ao perfil de carga, os processos industriais que apresentem um tempo de operação o mais constante possível e ao longo de todo o ano são os mais indicados para a integração de sistemas solares térmicos. Finalmente, o custo de integração de um sistema solar térmico num sistema convencional é um factor decisivo na seleção do ponto de integração adequado. Por exemplo a integração é, na maioria dos casos, menos dispendiosa para processos que operem com permutadores de calor externos, pois estes requerem uma manutenção menos dispendiosa comparativamente com permutadores de calor internos (Schmitt et al., 2017).

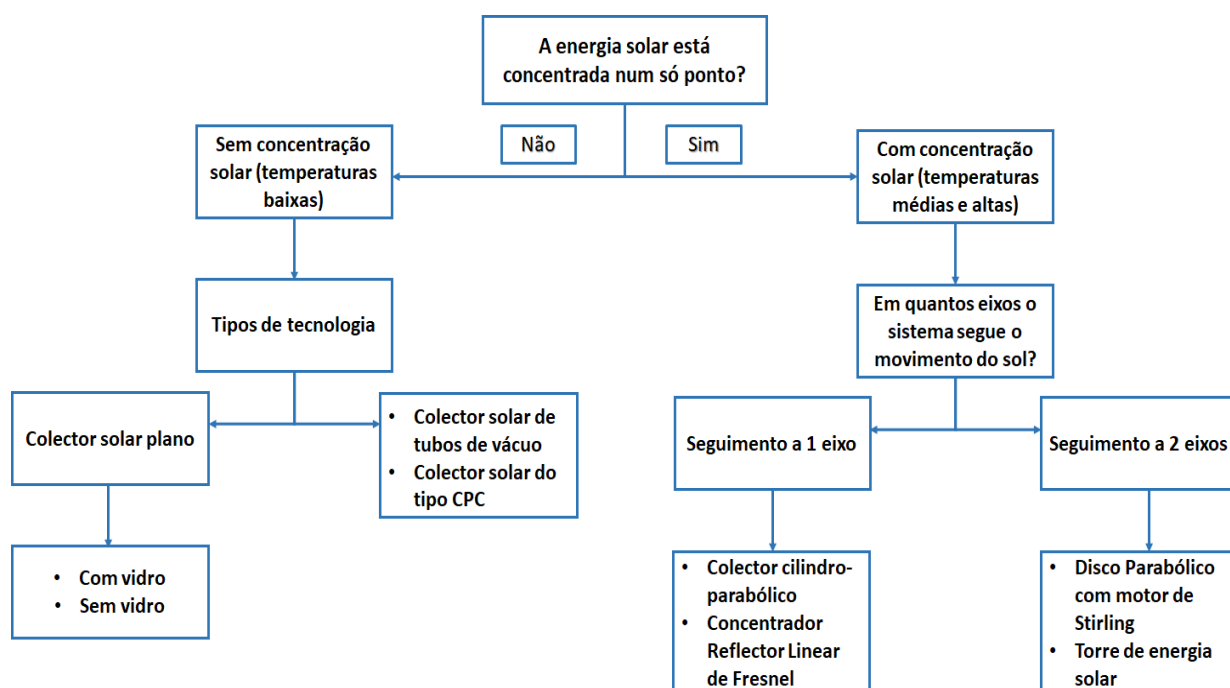
## 2.2. Tecnologias de energia solar térmica

As tecnologias de energia solar térmica, independentemente das estratégias adoptadas para aumentar o seu desempenho, e consequentemente, a sua eficiência, podem ser divididas em três categorias diferentes: colectores estacionários, colectores quasi-estacionários e colectores de seguimento. Os colectores estacionários são tecnologias que não possuem qualquer mecanismo de acompanhamento do movimento aparente do sol, tipicamente não possuindo concentração ou com um factor de concentração<sup>2</sup>  $C$  reduzido (de uma maneira geral com valores de  $C < 2$ ). Os colectores quasi-estacionários, que são uma tecnologia intermédia entre os colectores estacionários e os de seguimento, apresentam um factor de concentração superior aos colectores estacionários e não necessitam de um sistema de seguimento do sol. Neste tipo de colectores existe uma variação sazonal da sua inclinação ao longo do ano, com a possibilidade também dos espelhos do colector rodarem em torno dos seus respectivos tubos de absorção. Já os colectores de seguimento (*tracking*) são tecnologias com um ou dois eixos de rotação para acompanhamento do movimento aparente do sol. Tipicamente apresentam um factor de concentração alto (de uma maneira geral com  $C > 10$ ), que exigem o uso de sistemas de *tracking* que permitam condições de incidência dentro do ângulo de aceitação do colector.



<sup>2</sup>Factor de concentração é a relação entre a abertura do colector, que é a área do colector que está desobstruída enquanto está a ser irradiada ( $A_a$ ) e a área de absorção do colector,  $A_A$ . A equação do factor de concentração pode ser dada da seguinte forma:  $C = A_a / A_A$ .

Na figura 13 pode observar-se um esquema explicativo sobre as diferenças entre as diversas tecnologias de energia solar térmica.



**Figura 13: Esquema explicativo sobre as diferenças entre as tecnologias de energia solar térmica.**

**Fonte: Janse van Vuuren et al. (2017)**

Como se pode observar na figura 13 as principais diferenças entre os colectores estacionários e os colectores de seguimento residem no facto destes últimos serem tecnologias de Concentração de Energia Solar CSP (*Concentrated Solar Power*), utilizando concentradores ópticos, geralmente compostos por reflectores, para focar a radiação solar directa num receptor térmico. Estes podem dividir-se em colectores de rastreamento a 1 eixo ou a 2 eixos, dependendo do número de eixos do sistema que segue o movimento do Sol.





As tecnologias de colectores solares estacionários mais comuns atualmente disponíveis como produtos comerciais são:

- Colectores solares planos (CSP);
- Colectores solares de tubos de vácuo (CTV);
- Colectores solares do tipo Concentrador Parabólico Composto (CPC).

Os colectores solares planos são os dispositivos comumente mais utilizados para conversão da energia solar em energia térmica, sendo actualmente uma tecnologia já madura e comercialmente disponível. O absorsor neste tipo de colectores é plano e nele circula um fluido, que tanto pode ser água, muitas vezes por ser misturada com aditivos para proteger contra o congelamento, como outro tipo de fluidos, dependendo das temperaturas de funcionamento do sistema. As perdas por radiação no colector podem ser reduzidas utilizando para isso um revestimento selectivo no absorsor. Todos os colectores que utilizam este tipo de revestimento são designados por colectores selectivos, enquanto os que não utilizam são designados por não selectivos. Este tipo de revestimento possui um coeficiente de absorção o mais elevado possível nos comprimentos de onda correspondentes à radiação visível, possuindo ao mesmo tempo um coeficiente de emissão o mais baixo possível nos comprimentos de onda do infravermelho, correspondentes às temperaturas de funcionamento do colector (DGGE, 2004).

Os colectores solares planos são adequados a uma faixa de temperaturas até aos 100 °C e podem ser de dois tipos diferentes: com vidro e sem vidro (Horta, 2015). Os colectores solares planos com vidro possuem uma cobertura de vidro, como se pode observar na figura 14, e por isso são capazes de atingir temperaturas superiores e possuir valores superiores de eficiência se comparados com os colectores solares planos sem vidro, que podem ser observados na figura 15. Estes últimos, não possuindo essa cobertura, são o tipo de colector mais adequado para aplicações de baixas temperaturas, inferiores aos 30 °C. Uma vez que este tipo de colectores não possui cobertura de vidro consegue absorver uma quantidade maior de energia solar. No entanto, como não estão bem isolados, uma grande parte do calor absorvido é perdido, especialmente em dias mais ventosos e com temperaturas mais baixas. Os colectores solares planos com cobertura normalmente têm





isolamento térmico traseiro e lateral e podem possuir ou uma cobertura simples ou uma cobertura dupla. No caso dos colectores de cobertura dupla utiliza-se uma película fina transparente entre a cobertura de vidro e o absorvedor. O material mais utilizado normalmente para a função de cobertura dupla do colector solar plano é o Teflon, por ter uma transmissividade elevada e boa resistência térmica (DGGE, 2004).

A eficiência dos colectores solares planos, e que determina o desempenho que estes apresentam, depende de alguns parâmetros, tais como:

- Temperatura de operação dos colectores;
- Rendimento óptico, que determina a quantidade de radiação solar que atinge efectivamente o absorvedor e a sua transformação em calor no fluido de transferência;
- Coeficiente de perdas total do colector;
- Energia incidente no colector;
- Factor FR, que, segundo Kalogirou (2013), é um factor que corresponde à função entre o coeficiente de perdas de calor do colector e o caudal de circulação presente neste.

A eficiência de um colector não é um valor fixo, sendo representada pela curva de eficiência do colector. Esta permite uma pré-avaliação de uma determinada tecnologia de energia solar térmica, podendo ajudar a determinar se é ou não adequada para uma dada aplicação ou processo específico. A curva de eficiência de um colector é medida mantendo fixas todas as variáveis que afectam a sua eficiência, à excepção da sua temperatura de operação, o que faz com que a curva de eficiência de um colector dependa apenas deste último parâmetro.



**Figura 14: Exemplo de um coletor solar plano envidraçado.** Fonte: <http://www.energiasolar.lat>



**Figura 15: Exemplo de um coletor solar plano sem vidro.**  
Fonte: <https://floridasolar.designgroup.com>

Os colectores solares de tubos de vácuo, que podem ser observados na figura 16, são dispositivos que permitem uma redução acentuada das perdas por condução e uma eliminação das perdas por convecção. Isto é conseguido através da remoção do ar em torno do absorvedor, sendo que devido a esses menores coeficientes de perdas, o rendimento deste tipo de colectores é mais elevado, tal como as temperaturas atingidas por estes, comparativamente com os colectores solares planos. Este tipo de tecnologia já está relativamente madura e comercialmente disponível, sendo adequada para temperaturas até aos 120 °C (Horta, 2015).





Neste tipo de tecnologia um colector consiste numa fileira de tubos de vidro paralelos entre si, sendo que o formato do vidro em tubo tem como função suportar as forças de pressão causadas pelo vácuo (Cottret e Menichetti, 2010). Os colectores de tubos de vácuo possuem um componente de bário, denominado por *getter*, que tem como função manter o vácuo nos tubos de vidro, ao mesmo tempo que funciona como indicador visual do estado do vácuo no sistema (Cottret e Menichetti, 2010). No caso da presença de ar dentro destes, a cor prateada do bário dá lugar a uma cor mais esbranquiçada, detectando assim um mau funcionamento do sistema. Existem dois tipos de sistemas de tubos de vácuo que podem ser identificados (Cottret e Menichetti, 2010; Werke, 2008):

- Princípio de fluxo directo: o fluido de transferência de calor do circuito do colector circula directamente no absorvedor através de um tubo coaxial;
- Princípio dos *heat pipes*: um meio líquido, geralmente água, é evaporado dentro de um tubo de absorção selado. O vapor condensa-se numa zona de aquecimento localizada geralmente na extremidade superior do tubo, sendo aqui que a energia é transferida para o processo. Este sistema requer um ângulo de instalação específico para os colectores, de forma a garantir um bom funcionamento do sistema.



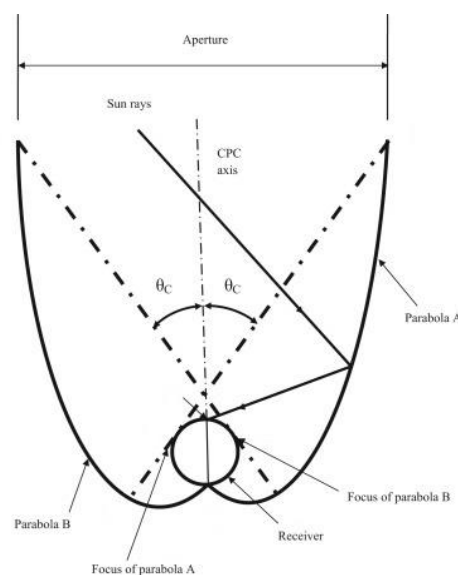
**Figura 16: Exemplo de um colector solar de tubos de vácuo.**

**Fonte: <http://www.fastresponseplumbing.com>**



Uma forma de reduzir as perdas de um colector solar térmico, e consequentemente, de aumentar as temperaturas fornecidas pelo colector, é reduzindo a área de absorção em relação à área de captação de energia solar, atendendo a que as perdas térmicas são proporcionais à área do absorvedor e não à área de captação, que se trata da abertura do colector. A concentração pode ser feita utilizando para isso reflectores que fazem com que a radiação, que incide com um ângulo inferior a um determinado ângulo na abertura do colector, incida no absorvedor após uma ou mais reflexões.

Um colector do tipo Concentrador Parabólico Composto (CPC), cujo esquema de princípio de funcionamento pode ser observado na figura 17, segue os princípios anteriormente descritos, e foi concebido para reduzir as perdas de calor do colector.



**Figura 17: Esquema do princípio de funcionamento de um colector solar do tipo CPC.**  
**Fonte: Devanarayanan e Murugavel (2014)**

Os colectores do tipo CPC podem ser projectados para diferentes níveis de concentração, dependendo dos ângulos de aceitação, sendo que este tipo de colectores, através de alguns ajustes sazonais de inclinação, pode ser do tipo estacionário ou quasi-estacionário. Os grandes ângulos de aceitação deste tipo de tecnologias é que permitem a captação de radiação directa e difusa tal como acontece com os colectores planos. Para um concentrador ideal, o ângulo de aceitação deve ser  $\theta < 30^\circ$ , e o seu factor de concentração





é baixo ( $C \leq 2$ ). Este tipo de colectores podem ser combinados com os colectores solares planos, com vidro externo, ou com os colectores solares de tubos de vácuo, como pode ser observado na figura 18. Dependendo do absorsor e do factor de concentração efectivo, este tipo de tecnologias é adequada para faixas de temperaturas até aos 150 °C (Horta, 2015).



**Figura 18: Vários colectores CPC combinados com tubos de vácuo. Fonte: <http://www.sunbest.solar>**

O desenvolvimento de tecnologias de concentração solar, maioritariamente a partir da década de 1980, estabeleceu o terreno para o aparecimento dos colectores de seguimento. Entre os comercializáveis, com seguimento a um eixo, destacam-se os seguintes:

- Colectores solares concentradores cilindro-parabólicos (CCP);
- Colectores solares Concentradores Lineares de Fresnel (CCF).

Os colectores cilindro-parabólicos, que podem ser observados na figura 19, são o tipo de colector mais comum e que apresenta um maior grau de maturidade quando se trata de colectores com um eixo de rotação, que podem ser orientados na direcção norte-sul ou este-oeste. Dependendo do tamanho dos reflectores, do factor de concentração e da área do campo de colectores, este tipo de tecnologia, como se pode ver na figura 21, consegue atingir valores de temperatura de processo da ordem dos 400 °C/450 °C (Horta, 2015; Cottret e Menichetti, 2010). Este tipo de colectores possui o seguinte princípio de funcionamento: os reflectores do colector, que possuem uma forma parabólica,



concentram a radiação solar directa no absorsor, colocado no foco linear da parábola. O absorsor é um tubo com uma área habitualmente 25 a 35 vezes inferior à abertura, e o fluido a aquecer circula através dele (DGGE, 2004). Se por um lado a captação de radiação solar difusa por este tipo de colectores é reduzida, a radiação directa é captada sempre com incidência normal, isto devido ao mecanismo de rotação que permite o acompanhamento do movimento aparente do Sol.

Os colectores cilindro-parabólicos podem funcionar segundo dois modos de operação (Cottret e Menichetti, 2010):

- Modo indirecto, em que o fluido de transferência de calor (geralmente óleo térmico) não evapora no campo de colectores;
- Modo directo, em que o vapor é gerado directamente no campo de colectores.



**Figura 19: Exemplo de um colector cilindro-parabólico. Fonte: <http://www.macoga.com>**

Os colectores solares Concentradores Lineares de Fresnel, que podem ser observados na figura 20, utilizam reflectores ou lentes que seguem o princípio de Fresnel. Este tipo de colectores consegue focar a radiação solar num tubo receptor, que este está localizado num ponto focal comum aos reflectores. A energia concentrada é então transferida através do absorsor para o fluido térmico, passando depois para um permutador de calor, onde irá alimentar o sistema pretendido.





O princípio da lente de Fresnel é o de dividir a superfície contínua de uma lente padrão num conjunto de superfícies com descontinuidades entre elas. Este princípio faz com que haja uma redução substancial na espessura da lente, fazendo por isso com que haja uma redução no peso e no volume desta, em detrimento da redução da sua qualidade de imagem. Assim, apesar de uma eficiência mais reduzida, as vantagens económicas dos concentradores de Fresnel são consideráveis, devido à sua simplicidade construtiva e ao facto de reduzir o volume de material necessário para o reflector.

Tal como os colectores cilindro-parabólicos, os colectores concentradores de Fresnel, e dependendo do tamanho dos reflectores, do factor de concentração e da área do campo de colectores, como se pode ver na figura 21, consegue atingir valores de temperatura na ordem dos 400 °C (Horta, 2015; Cottret e Menichetti, 2010).



**Figura 20: Exemplo de um colector cilindro-parabólico. Fonte: <http://www.macoga.com>**

A selecção da tecnologia de colector solar mais adequada a um determinado processo industrial estará, obviamente, directamente relacionada com as necessidades de calor e as condições de operação que o processo exige. Na figura 21 pode-se observar o intervalo de temperaturas que diferentes sectores industriais necessitam, desde os 50 °C até aos 400 °C, e as diferentes tecnologias de colectores, sejam estacionárias ou de seguimento, que mais se adequam a esses valores de temperatura. Existindo obviamente processos

industriais que requerem temperaturas de processo mais elevadas que 400 °C, a figura 21 apenas mostra sectores industriais que necessitam de temperaturas até esse valor, onde os sistemas solares térmicos possam ser aplicados.

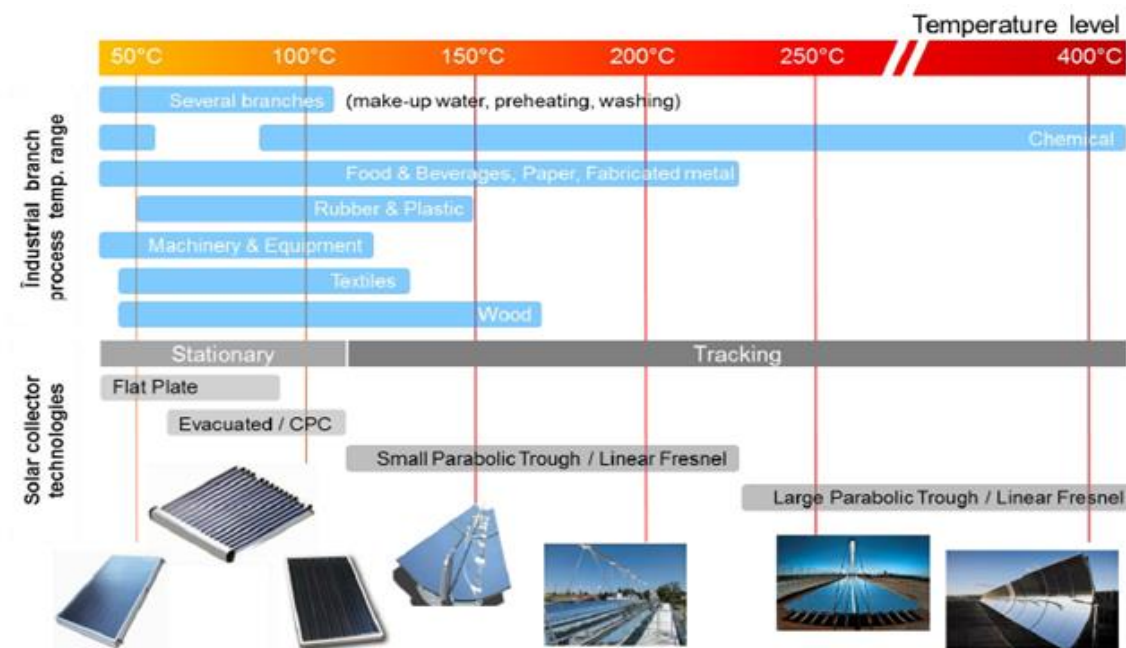


Figura 21: Gama de temperaturas para diferentes tecnologias e indústrias. Fonte: Horta (2015)

## 2.3. Custos dos diferentes sistemas de energia solar térmica

Os custos de sistemas solares térmicos são muito variáveis, dependendo do tipo de tecnologia que é utilizada, que está em consonância com o valor de temperaturas que se pretende obter, da dimensão da área de captação, e se o sistema possui ou não armazenamento.

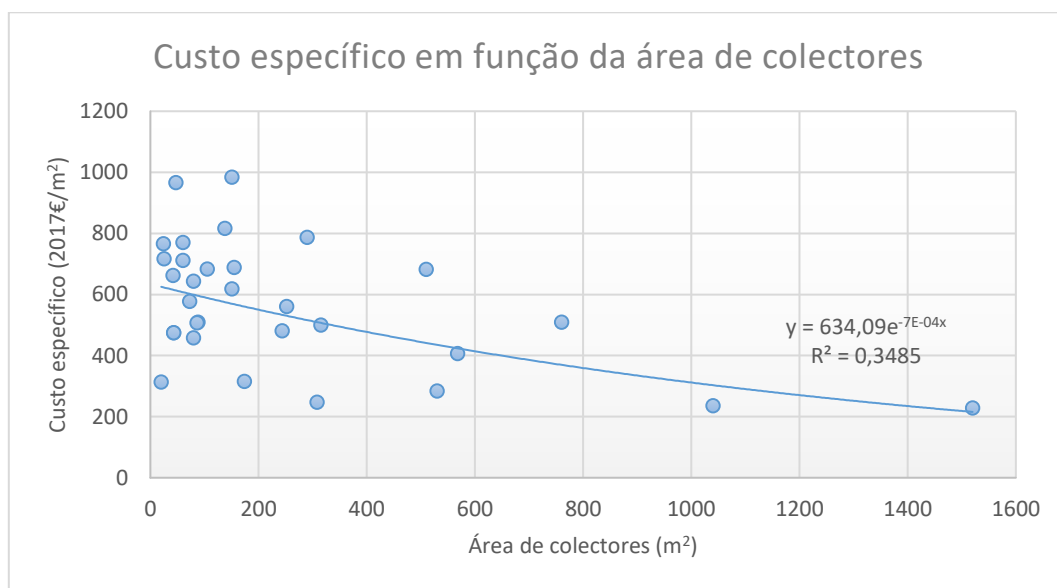
Através da plataforma *SHIP* foram retirados os dados para obter o custo específico, em €/m<sup>2</sup>, de sistemas solares térmicos, baseados nas diferentes tecnologias da energia solar térmica. De realçar que apenas se consideraram países europeus para que não existisse uma grande dispersão dos custos dos sistemas. Todos os custos apresentados são custos reais, tendo os custos nominais sido actualizados com base na inflação. Este processo de actualização foi feito de forma a deixar uniformes os custos nominais e poder agrupá-los e compará-los numa só tabela. Neste caso a conversão dos valores nominais foi feita para





o ano de 2017 e os valores de inflação anual, para os diferentes países europeus a que pertencem essas instalações, foram retirados, maioritariamente, do portal <http://ec.europa.eu/eurostat>. Pontualmente foram também retirados valores do portal <http://pt.inflation.eu>, onde se encontra a informação actualizada sobre a inflação actual e histórica por país. Os custos totais dos diferentes tipos de sistemas retirados da plataforma *SHIP* incluem os custos com os equipamentos, tais como os colectores solares, a rede de distribuição de energia térmica, as construções auxiliares, o sistema de armazenamento de energia térmica, o projecto, e a instalação e comissionamento sem subsídios.

Foi observado que de uma forma geral quanto menor é a área instalada de colectores, e de acordo com a potência térmica requerida pelo sistema, mais elevados são os custos dos sistemas solares térmicos por  $m^2$ , ou seja, mais elevados são os custos específicos de investimento do sistema. Esta tendência pode ser vista na figura 22, onde se indicam os custos específicos de investimento ( $€/m^2$ ) de sistemas de colectores solares plano (na figura apenas se considerou esta tecnologia por ser aquela para a qual se dispunha de uma amostra de dados superior), em função da área de colectores instalados.



**Figura 22: Custo específico dos sistemas solares térmicos em função da área de colectores solares planos**



Os custos específicos de investimento das diferentes tecnologias, para instalações situadas na Europa, podem ser vistos na tabela 2.

**Tabela 2: Custos específicos de investimento das diferentes tecnologias de energia solar térmica para instalações industriais que utilizam sistemas de energia solar térmica na Europa**

| Tipo de tecnologia | Custo de investimento inicial (€ <sub>2017</sub> /m <sup>2</sup> ) |         | Intervalo de custos (€ <sub>2017</sub> /m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|--|---------|--|
|                    | Valor médio  | Mediana |  |
| <b>CSP</b>         | 575,3  | 560,8   | 236,2 - 984,5  |
| <b>CCP</b>         | 913,2  | 520,6   | 229,2 - 2154,4   |
| <b>CTV</b>         | 858,5  | 687,3   | 687,2 - 1504,8   |
| <b>CCF</b>         | 142,5  | 142,5   | 142,5  |

O custo específico de investimento do sistema de concentradores de Fresnel tem de ser lido com algumas reservas, pois para este tipo de sistema somente existem dados para uma instalação, logo o valor apresentado não é um valor representativo do custo específico de investimento. Isto explica-se pelo facto de esta tecnologia ainda estar numa fase de desenvolvimento, e por isso não se consegue obter uma amostra de dados significativa acerca dela. Foram também pesquisados, em artigos científicos, outras referências a custos das diferentes tecnologias de energia solar térmica, tanto os custos do investimento inicial como os de operação e manutenção do sistema, tendo todos estes valores sido devidamente actualizados em termos de inflação para o ano de 2017. Esta pesquisa teve como objectivo poder comparar os custos dos colectores obtidos na plataforma *SHIP* com os custos encontrados nos artigos científicos, e verificar então se estes estão em consonância entre si.

Em Schweiger et al. (2000) encontram-se alguns valores de custos para diferentes tecnologias de energia solar térmica para gerar calor de processo, neste caso para Portugal e Espanha. Estes podem ser divididos em custos de investimento inicial e custos de



operação e manutenção anuais. O tempo médio de vida dos colectores encontrados neste artigo científico foi estimado em cerca de 15 anos. Em Riffelmann et al. (2000) também podem ser observados valores de custos para as diferentes tecnologias, sendo que o país em estudo neste caso é a Alemanha. Estes custos podem ser divididos em custos de investimento iniciais, custos de operação e manutenção anuais e custos anuais totais, que incluem os custos de operação e manutenção mais uma anuidade, devido a um empréstimo necessário para cobrir os custos iniciais do sistema, estimada para uma taxa de juro de 6%. Neste estudo o tempo médio de vida dos colectores foi estimado em 15 anos. Mais valores de custos para diferentes tecnologias de sistemas de energia solar térmica também podem ser encontrados em Lauterbach et al. (2011). Neste caso o país em estudo também se trata da Alemanha, e apenas existem os custos iniciais de investimento do sistema, para um campo de colectores de 500 m<sup>2</sup>. Por fim foram também retirados custos em IRENA (2015), embora neste caso sejam apenas referidos os custos de investimento inicial do sistema, sendo estes uma média dos custos que se praticam em solo europeu. Todos os valores de custos referidos anteriormente podem ser vistos nas tabelas 3 e 4.

**Tabela 3: Custos específicos de investimento inicial para as diferentes tecnologias de energia solar térmica**

| Tipo de tecnologia | Custos específicos de investimento inicial (€ <sub>2017</sub> /m <sup>2</sup> ) |                           |                            |                             |                      |                                  |
|--------------------|---|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|
|                    | (Schweiger, 2000) Portugal  | (Schweiger, 2000) Espanha | (Riffelman, 2000) Alemanha | (Lauterbach, 2011) Alemanha | (IRENA, 2015) Europa | (Mediana) Plataforma SHIP Europa |
| CSP                | 360,7   | 368,0                     | 327,3                      | 487,2                       | -                    | 560,8                            |
| CCP                | 432,8   | 441,7                     | 327,3                      | -                           | 552,2                | 520,6                            |
| CTV                | 721,3   | 736,1                     | -                          | 704,9                       | -                    | 687,3                            |
| CTV (com CPC)      | 577,0   | 588,9                     | 654,6                      | 663,2                       | 382,3 – 764,5        | -                                |
| CCF                | -   | -                         | -                          | -                           | 552,2 – 764,5        | 142,5                            |



**Tabela 4: Custos específicos de operação e manutenção das diferentes tecnologias de energia solar térmica**

| Tipo de tecnologia   | Custos de operação e manutenção (€ <sub>2017</sub> /m <sup>2</sup> ) |  |   |
|----------------------|--|--|---|
|                      | (Schweiger, 2000)<br>Portugal  | (Schweiger, 2000)<br>Espanha                   | (Riffelmann, 2000)<br>Alemanha              |
| <b>CSP</b>           | -  | -  | 3,3 (1% do custo de investimento inicial)   |
| <b>CCP</b>           | 7,2 (1,66 % do custo de investimento inicial)                        | 7,4 (1,68 % do custo de investimento inicial)  | 6,5 (2% do custo de investimento inicial)   |
| <b>CTV (com CPC)</b> | 3,6 (0,625 % do custo de investimento inicial)                       | 3,7 (0,625 % do custo de investimento inicial) | 3,3 (0,5% do custo de investimento inicial) |

Analisando a tabela 3 podemos observar que os valores de investimento em sistemas com colectores cilindro-parabólicos e tubos de vácuos obtidos através da plataforma *SHIP* e dos artigos referenciados não apresentam uma grande discrepância entre si. A única excepção é o valor apresentado em (Riffelmann et al., 2000) para os colectores cilindro-parabólicos, que é bastante inferior a todos os outros apresentados (cerca de 40% menor relativamente à plataforma *SHIP*), estando ainda assim acima do valor mínimo obtido nesta plataforma. No que toca aos colectores solares planos nenhum dos valores de custo específico de investimento dos diferentes artigos científicos consultados se aproxima do valor obtido na Plataforma *SHIP*. Esta diferença pode explicar-se por os custos retirados da plataforma *SHIP* serem referentes a vários países europeus, enquanto que os valores encontrados nos artigos científicos serem referentes somente a três países: Portugal, Espanha e Alemanha. No caso dos colectores concentradores de Fresnel não se podem tirar grandes conclusões acerca dos custos deste tipo de tecnologia pois existem ainda poucos dados actualmente para se ter uma amostra com significância.





A plataforma *SHIP* não apresenta os custos de operação e manutenção do sistema solar, sendo que estes custos influenciam a escolha de uma determinada tecnologia em detrimento de outra. São custos essenciais de se obter, pois determinam, juntamente com os custos iniciais de investimento, os custos totais de produção energética ao longo da vida útil do sistema. Observando os custos específicos de investimento inicial dos colectores solares planos e cilindro-parabólicos apresentados nas tabelas 2 e 3 conclui-se que estes são relativamente semelhantes entre si. Analisando a tabela 4, os custos de operação e manutenção de ambos também são semelhantes, com os colectores solares planos ainda assim a apresentar custos de operação e manutenção inferiores. Os custos de operação e manutenção dos colectores cilindro-parabólicos presentes em Schweiger et al. (2000) são também relativamente semelhantes aos apresentados em Riffelmann et al. (2000).

Pode-se concluir então que, em função dos custos dos diferentes sistemas de energia solar térmica (custos iniciais de investimento e custos de operação e manutenção), os colectores solares planos apresentam-se como a tecnologia de energia solar térmica mais económica. Este facto já era expectável *a priori*, dado este tipo de sistemas, dentro de todas as tecnologias de produção de energia solar térmica actualmente, ser a que atinge valores de temperatura mais reduzidos, para além de ser actualmente a tecnologia mais madura e comercializada há mais tempo.



## 3. O sector da cortiça

### 3.1. O montado e a cortiça

A cortiça natural em bruto consiste na parte exterior da casca do sobreiro, sendo constituída por pequenos alvéolos em forma de poliedro de 14 lados (Gonçalves e Amaro, 2005). Estes alvéolos estão comprimidos com uma densidade que pode ir até aos 40 milhões por  $\text{cm}^3$ , e estão separados entre si por uma parede formada por um revestimento com 3 camadas: uma camada lenhosa que lhe fornece a estrutura, rodeada por uma camada suberosa, que por sua vez está coberta com uma camada de celulose. A substância básica da cortiça é a suberina, um polímero natural que se encontra nas paredes das células da cortiça, e que é impermeável a gases e líquidos e também resistente ao fogo e aos insectos. Estas características fazem com que a deterioração natural da cortiça seja bastante reduzida.

O sobreiro, de uma grande longevidade e com uma enorme capacidade de regeneração, teve a sua origem no Mediterrâneo Ocidental, tendo encontrado em Portugal as condições propícias ao seu desenvolvimento. Os ecossistemas de sobreiros desempenham um papel ambiental e socioeconómico muito importante na bacia do Mediterrâneo. A exploração de ecossistemas de sobreiro para a produção de cortiça natural em bruto tem uma contribuição importante para o nosso país em termos de valorização económica, social, ambiental, paisagística e cultural. Esta exploração tem impactos ambientais bastante positivos e benignos, como por exemplo o sequestro de carbono, que contribui para a redução das concentrações de GEE na atmosfera. Os montados de sobreiro, que se podem definir como sistemas *agrossilvopastoris*, possuem dentro do panorama florestal nacional um elevado valor conservacionista, abrigando dentro de si uma fauna e flora variadas, como por exemplo as espécies cinegéticas.

Apenas duas espécies de sobreiros são susceptíveis de ser utilizadas para a produção de cortiça natural: a *Quercus suber* e a *Quercus variabilis*. A primeira espécie encontra-se em explorações silvícolas nas regiões mediterrânicas de Portugal, Espanha, Marrocos,



Argélia, França, Tunísia e Itália (por ordem decrescente de área de sobreiro por país), onde ocupa uma área total de cerca de 2,1 milhões de hectares (APCOR, 2018). A segunda, que ao contrário da *Quercus suber* se trata de uma árvore de folha caduca, está presente em florestas selvagens, principalmente na China (Concorrência, 2012). As características da cortiça extraída das duas espécies de sobreiro são distintas entre si. A *Quercus suber* é uma variedade de sobreiro com cortiça de qualidade superior relativamente à *Quercus variabilis*, e que permite uma maior diversidade de aplicações e possui um maior valor acrescentado para a indústria da cortiça.

Portugal tem sido, nas últimas décadas, o líder na produção mundial de cortiça natural da espécie *Quercus suber*. O país possuía, no ano de 2018, 734 000 hectares (34%) dos 2 239 942 hectares de montado de sobro existentes a nível mundial (APCOR, 2018).

Segundo o último inventário florestal nacional (ICNF, 2013) o sobreiro era, para o ano de 2010, a segunda espécie de árvore com mais área de floresta nacional, ocupando cerca de 736 775 mil hectares de floresta na área territorial de Portugal Continental. O sobreiro ocupava assim, para o ano de 2010, 23% da área florestal arborizada do território continental português, sendo apenas ultrapassado pelo eucalipto, que ocupava uma área de cerca de 812 000 hectares em Portugal Continental, o que representava uma ocupação de 26% da área florestal nacional.

### **3.2. Caracterização da indústria da cortiça**

A floresta portuguesa, para além do incontornável valor ambiental que lhe está associada, possui também uma relevância económica e social bastante elevada. Em 2016 a actividade florestal representava 2% do total das empresas em Portugal (7600 empresas), com 3% do volume total de negócios do país e 3% do número de pessoas ao serviço (APCOR, 2018).

Em 2010, Portugal foi líder na produção mundial de cortiça, com uma produção que ascendeu a 201 000 toneladas. O nosso país produziu nesse ano cerca de 49,6% do valor total de cortiça produzida mundialmente, representado assim cerca de 100 000 toneladas

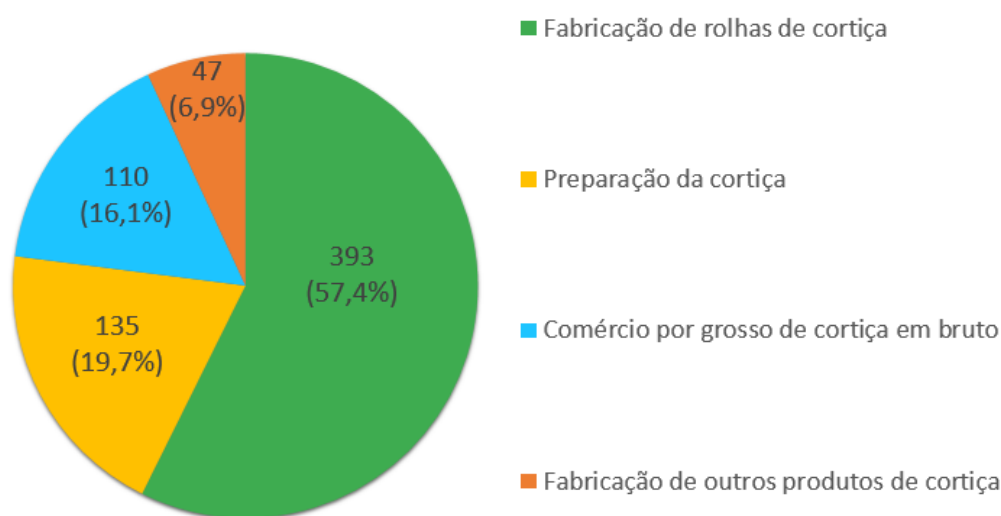




de cortiça produzida (APCOR, 2018). Para além do nosso país, Espanha era, para o ano de 2010, o segundo maior produtor mundial de cortiça, apresentando uma produção de cerca de 62 000 toneladas, correspondendo a 30,5% da produção mundial de cortiça. Portugal e Espanha representavam assim mais de três quartos da produção mundial de cortiça para o ano de 2010 (APCOR, 2018).

A indústria da cortiça em Portugal representava, para o ano de 2016, 0,2% do número de empresas do sector florestal, 0,4% do volume de negócios e 0,3% do número de pessoas ao serviço neste sector (APCOR, 2018). De acordo com as informações fornecidas pelo Gabinete de Estratégia e Planeamento - Ministério do Trabalho, Solidariedade e Segurança Social (GEP, 2017), o número de empresas da indústria da cortiça em Portugal aumentou na ordem de 1% entre 2015 e 2016. Este sector possuía, para o ano de 2016, 685 empresas a operar em Portugal (516 no concelho de Santa Maria da Feira), que produziram cerca de 40 milhões de rolhas por dia (35 milhões das quais no Norte do país), empregando entre si 8310 trabalhadores (6353 no concelho de Santa Maria da Feira) (APCOR, 2018).

A figura 23 apresenta o número de empresas do sector corticeiro português por área de actividade económica.



**Figura 23: Empresas portuguesas da indústria da cortiça por sector de actividade económica em 2017. Fonte: GEP (2017)**





Observa-se que a fabricação de rolhas domina o sector da cortiça, com mais de metade das empresas em Portugal deste sector a dedicar-se a esta actividade económica. Actualmente, para além da utilização da cortiça para a fabricação de rolhas, existem outras aplicações, que vão desde a fabricação de materiais de construção de edifícios, até ao mundo da decoração ou da indústria da moda.

### 3.2.1. Exportações

Segundo os dados do comércio externo do Instituto Nacional de Estatística (INE), as empresas portuguesas da indústria da cortiça exportaram, em 2017, 986,3 milhões de euros (62,4% do total mundial de cortiça exportada), equivalente a 197 milhares de toneladas de cortiça exportadas. Este valor de exportações significou um aumento de 5,4% em valor facturado e 7,1% em volume face a 2016 (INE, 2017).

As exportações portuguesas de cortiça representam cerca de 2% do total de exportações de bens portugueses, 1,2% das exportações totais portuguesas, correspondendo a um *superavit* de 815,6 milhões de euros, com uma taxa de cobertura das importações pelas exportações de 578%, um valor sem paralelo na economia portuguesa (APCOR, 2018). Pode-se afirmar então que o sector da cortiça possui um papel fundamental no que toca ao desenvolvimento económico português, tanto em termos actuais como em termos de potencial de valorização futura, com um valor acrescentado para Portugal muito relevante.

A Europa foi, em 2017, o principal destino das exportações portuguesas de cortiça, com mais de 64% do total exportado em valor e cerca de 71% em volume (APCOR, 2018). Os principais países de destino das exportações portuguesas de cortiça, em 2017, foram a França (18,9%, o que equivaleu a cerca de 186,3 milhões de euros), os Estados Unidos da América (17,1%, o que equivaleu a cerca de 168,6 milhões de euros), a Espanha (13,2%, o que equivaleu a 130,5 milhões de euros), a Itália (10%, o que equivaleu a cerca de 99,1 milhões de euros) e a Alemanha (7,4%, o que equivaleu a cerca de 73,3 milhões de euros) (APCOR, 2018). Apesar de a França ter sido em 2017 o país líder nas exportações



portuguesas de cortiça em valor facturado, a Espanha ocupa a primeira posição quando se analisam as exportações portuguesas de cortiça em volume de exportações, com cerca de 44,1 milhares de toneladas exportadas. Seguiram-se depois a Alemanha (cerca 30 milhares de toneladas exportadas), os Estados Unidos da América (cerca de 21,9 milhares de toneladas exportadas), a França (cerca de 17,6 milhares de toneladas exportadas) e a Itália (cerca de 11,7 milhares de toneladas exportadas).

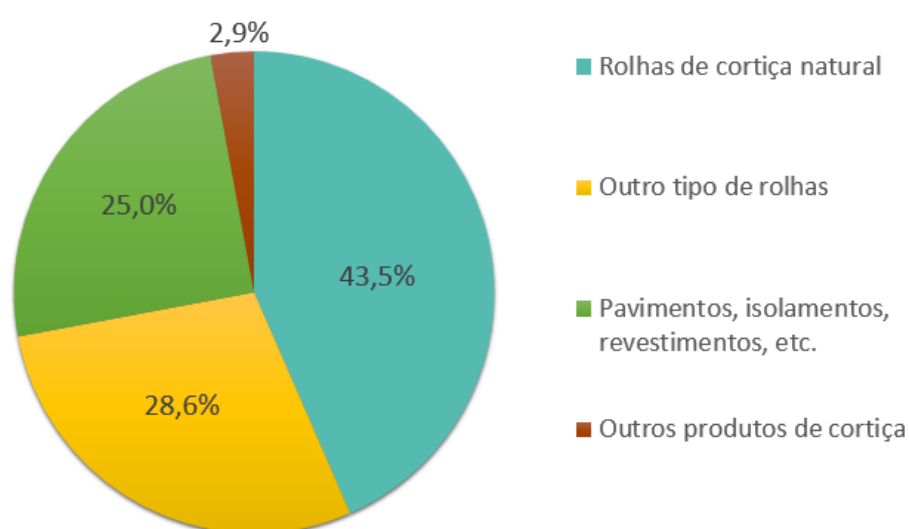
### 3.2.2. Importações

Em Portugal, o sector da indústria da cortiça apresenta uma capacidade transformadora que ultrapassa largamente a produção interna de matéria-prima. Daqui resulta que Portugal, apesar de ser um dos líderes mundiais na exportação de cortiça, é também um dos líderes mundiais na importação deste tipo de matéria-prima. Portugal, em 2017, foi o terceiro maior importador mundial de cortiça, que utiliza para transformação e posterior exportação sob a forma de produtos de consumo final, com uma quota de 10,8% do total de cortiça importada mundialmente para esse ano. Em 2017, o valor das importações na indústria da cortiça atingiu um volume de 87,8 milhares de toneladas, com um valor de importações desta matéria-prima de 170,7 milhões de euros, registando um aumento de 2,1% face a 2016 (APCOR, 2018). As importações do sector da cortiça, em 2017, foram na sua grande maioria proveniente de Espanha, com 78% do total do valor de importações, o que equivaleu a 132,5 milhões de euros. Para além de Espanha, Portugal também importou cortiça, para o ano de 2017, proveniente de Marrocos, Itália, EUA, Tunísia, França, Argélia e Suíça (por ordem decrescente de valor económico de importações), num total de cerca 17,4 milhares de toneladas importadas, o que equivaleu a 36,4 milhões de euros. De todos os restantes países mundiais Portugal importou cerca de 0,23 milhares de toneladas de cortiça, equivalentes a 1,9 milhões de euros. O principal produto importado é a cortiça natural, que atingiu em 2017 um valor de importação de 133,3 milhões, correspondendo a cerca de 78% do total das importações portuguesas de cortiça (APCOR, 2018).



### 3.2.3. O mercado dos produtos de cortiça

O principal sector de destino dos produtos de cortiça em 2017 foi a indústria vinícola, seguida do sector dos materiais de construção, sendo que neste sector estão incluídos os materiais para pavimentos, isolamentos e revestimentos (APCOR, 2018). Na figura 24, apresentam-se as exportações portuguesas na indústria da cortiça em função do tipo de produtos exportados.



**Figura 24: Estrutura das exportações portuguesas de cortiça em 2017 por tipo de produtos em valor facturado. Fonte: INE (2017)**

Verifica-se, que as rolhas de cortiça lideraram as exportações portuguesas de cortiça para o ano de 2017, assumindo 72,1% do total exportado por esta indústria, correspondendo a um total de 710,7 milhões de euros em valor de exportação, seguido da cortiça como material de construção, com 25% do total exportado por esta indústria, o que correspondeu a 246,8 milhões de euros em valor de exportação (APCOR, 2018).

Relativamente às rolhas de cortiça, e para o ano de 2017, as rolhas naturais lideraram em termos de valor de exportação, com cerca de 60% do total de rolhas de cortiça exportadas, o que correspondeu a 428,6 milhões de euros em valor facturado. No que diz respeito a outras rolhas de cortiça, onde se incluem as rolhas técnicas como aglomeradas, 1+1, micro, entre outras, a quota de exportação para 2017 foi de 21%, o que correspondeu a





cerca de 149,8 milhões de euros em valor de facturado. Por fim as rolhas de cortiça para champanhe tiveram uma quota de exportação em 2017 de 19%, o que correspondeu a cerca de 132,4 milhões de euros em valor facturado (APCOR, 2018).

No que toca aos materiais de construção, os principais produtos exportados em 2017 eram os ladrilhos, cubos, blocos e outros produtos com aglutinantes, com um valor facturado de 156,4 milhões de euros, o que correspondeu a 73,9 milhares de toneladas em volume de exportação. Dentro dos materiais de construção, os desperdícios de cortiça foram o segundo produto mais exportado em 2017, com um valor facturado de 47,2 milhões de euros, o que correspondeu a 45,7 milhares de toneladas em volume de exportação. De realçar que, apesar do segmento das rolhas de cortiça liderar destacadamente no que toca a valores de exportação facturados em 2017, nas exportações em volume são os materiais de construção que lideram. Em 2017, este segmento da indústria corticeira obteve uma quota em volume de exportação de 69,4% do total exportado, o que equivaleu a 136,7 milhares de toneladas. Já as rolhas de cortiça obtiveram uma quota em volume de exportação em 2017 de 25,7% do total exportado, o que correspondeu a 50,7 milhares de toneladas (APCOR, 2018).

### **3.2.4. Resíduos de cortiça com potencial de aproveitamento energético**

Nas operações de fabricação de produtos de cortiça natural são gerados resíduos de cortiça de vários tipos, como aparas, pedaços e rolhas defeituosas, e que são geralmente utilizados na produção de granulados de cortiça. É produzido também o pó de cortiça, termo utilizado para cobrir os resíduos de cortiça com dimensões inferiores às permitidas para a fabricação de aglomerados. O pó de cortiça é um material com tamanho de partícula inferior a 0,25 mm e, em alguns casos, pode ser recolhido por sucção durante as várias operações de processamento da cortiça (trituração, separação granulométrica, transporte, acabamento, etc.) (Nepomuceno Pereira et al., 2017). É estimado que cerca de 25% da matéria-prima utilizada na produção de rolhas naturais é transformada em pó de cortiça, sendo este utilizado principalmente como fonte de combustível. Uma pequena fracção do pó de cortiça pode também ser utilizada como preenchimento (misturado com



colas) para rolhas aglomeradas ou para a produção de linóleo (segundo o portal <https://www.infopedia.pt>, o linóleo trata-se de um tecido impermeável feito de juta e untado com uma mistura de óleo e cortiça em pó, usado como tapete ou cobertura) (Gil, 1998; Nepomuceno Pereira et al., 2017). O pó de cortiça pode também ser usado no fabrico de explosivos e na agricultura (Gil, 1997).

Uma das políticas de sustentabilidade das empresas do sector corticeiro é a utilização dos resíduos de cortiça, não adequados para a fabricação de produtos de cortiça, para a produção de energia em caldeiras de biomassa, de forma a suprir as necessidades energéticas da própria empresa. Dependendo do processo de produção, os rendimentos de geração do pó de cortiça podem variar entre 20 a 40%, e este pode apresentar um poder calorífico superior na faixa de 15 a 30 MJ/kg, dependendo do tipo de pó, e uma densidade aparente com valores aproximadamente entre 60 e 379 kg/m<sup>3</sup> (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

De uma maneira geral pode-se afirmar que todos os resíduos industriais de cortiça podem ser reutilizados/reciclados, contribuindo assim para a valorização e aproveitamento deste tipo de material.

### **3.3. Processos de produção e necessidades de calor na indústria da cortiça**

Na indústria corticeira existem diversas etapas onde a cortiça será transformada no produto que se deseja obter, como rolhas de cortiça ou aglomerados. Antes de chegar à fábrica, as diversas etapas vão desde a plantação do montado de sobreiro até ao transporte da casca dos sobreiros até à indústria. Na indústria proceder-se-á à preparação das pranchas de cortiça, que envolve a cozedura e a secagem destas, seguido do processo de produção das rolhas de cortiça ou do processo de aglomeração, no caso de serem produzidos aglomerados de cortiça. Os processos da indústria da cortiça que requerem uma quantidade intensiva de calor de processo estão relacionados com os processos de cozedura das pranchas de cortiça natural, secagem das mesmas e também processos de aglutinação de grânulos de cortiça durante o fabrico de produtos de cortiça aglomerada

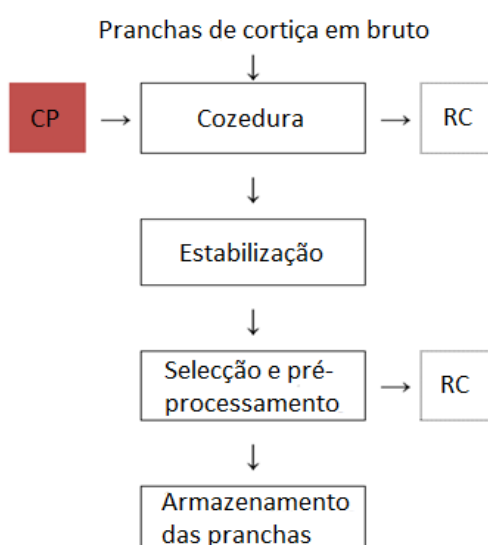


(Nepomuceno Pereira et al., 2017). Como nesta dissertação apenas se irá considerar a instalação de um sistema solar térmico para o processo de cozedura das pranchas de cortiça, é este processo que irá ser estudado e detalhado mais aprofundadamente.

### 3.3.1. Preparação das pranchas de cortiça

O primeiro passo na preparação das pranchas de cortiça é o processo de cozedura destas, seguido de um processo de estabilização por um período de uma a quatro semanas até as pranchas atingirem um teor de humidade de 8 a 16%, através de um processo de secagem natural ou através de secagem em ambiente condicionado com ar aquecido.. Após este período, as pranchas de cortiça são submetidas a operações de selecção e pré-processamento, onde o material não adequado para a produção de rolhas é eliminado e o material adequado é calibrado e classificado de acordo com a sua utilização. Os resíduos de cortiça gerados, tais como os restos do processo de cozedura, e as aparas e pranchas de cortiça defeituosas das operações de selecção e pré-processamento, podem ser utilizados para a produção de cortiça granulada (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

Um diagrama com as principais etapas envolvidas no processo de produção das pranchas de cortiça pode ser visto na figura 25.



**Figura 25: Etapas do processo de preparação das pranchas de cortiça natural. CP – Calor de processo; RC- resíduos de cortiça. Fonte: Nepomuceno Pereira et al. (2017)**





### 3.3.1.1. Cozedura das pranchas de cortiça

A cozedura das pranchas é realizada através da imersão das pranchas de cortiça num tanque com água quente limpa, a uma temperatura próxima dos 100 °C e durante um período de pelo menos 60 minutos, que pode ser prolongado até 90 minutos. A este primeiro processo de cozedura das pranchas de cortiça pode opcionalmente seguir-se um segundo, de duração de cerca de 30 minutos, de forma a garantir que todas as impurezas presentes nas pranchas de cortiça foram eliminadas e que estas cumprem todos os requisitos de qualidade definidos para esta indústria.

Existem dois métodos para executar a operação de cozedura das pranchas de cortiça: tradicional e contínuo. No método tradicional, a água de processo utilizada na cozedura das pranchas de cortiça é aquecida utilizando uma caldeira de grelha (num sistema de combustão directa em que o calor é fornecido directamente à base do tanque, que está em contacto com a chama de combustão). As paredes do tanque de cozedura são feitas de alvenaria, a base é geralmente feita de cobre e o topo aberto ao ar circundante. Este tipo de sistema acarreta consigo dois aspectos negativos:

- 1) O consumo de água é muito elevado para alcançar uma elevada eficiência na extracção de compostos indesejados e para compensar as perdas de água por evaporação (que são significativamente mais elevadas neste tipo de sistema) e por absorção das pranchas de cortiça natural;
- 2) Os valores de eficiência energética do sistema acabam por ser muito reduzidos devido ao sistema de tanque aberto, que provoca perdas térmicas elevadas e um consequente aumento da carga térmica requerida (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

Já no método contínuo o calor é produzido numa caldeira de combustão e entregue ao tanque de cozedura sob a forma de vapor que aquece a água de processo à temperatura necessária para o processo de cozedura das pranchas de cortiça. A caldeira de combustão pode estar associada a um sistema de produção de calor centralizado ou acoplada directamente ao tanque de cozedura. O método contínuo pode operar com filtração contínua da água de processo, lavagem automática e recuperação energética quando a água de processo é substituída.



### **3.3.1.2. Processo de secagem das pranchas de cortiça**

O processo de secagem visa garantir os níveis padrão do teor de humidade das pranchas de cortiça. O contacto entre a superfície das pranchas de cortiça e o ar quente circundante provoca a evaporação da água contida no material, o que faz com que haja uma diminuição da temperatura do ar de processo e o consequente aumento da sua humidade relativa, o que resulta que seja necessário reaquecer e desumidificar o ar. A velocidade e a qualidade da secagem são fortemente influenciadas pela temperatura e humidade relativa do ar de secagem.

No caso das rolhas de cortiça é recomendado que a temperatura do ar de secagem esteja entre 40° e 55°C, sendo que este processo de secagem pode levar entre 30 minutos e 24 horas, dependendo do tipo de rolha. O teor de humidade deste pretendido após a secagem deve variar entre 8% e 16% e a secagem das rolhas de cortiça pode ser realizada em sistemas de secagem naturais, fornos de ar quente com circulação forçada e fornos a vácuo. Nestes últimos, como a pressão no compartimento de secagem é reduzida, o processo de evaporação ocorre a temperaturas mais baixas (Nepomuceno Pereira et al., 2017). Já os grânulos de cortiça, utilizados como matéria-prima na produção de aglomerados, necessitam de um teor de humidade entre 6% e 10%, e a temperatura do ar de secagem deve ser da ordem dos 150 °C. Esse nível de temperatura é conseguido maioritariamente através de um processo de circulação de ar quente forçado, geralmente produzido numa caldeira de combustão (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

O processo de secagem visa garantir os níveis padrão do teor de humidade das pranchas de cortiça. O contacto entre a superfície das pranchas de cortiça e o ar quente circundante provoca a evaporação da água contida no material, o que faz com que haja uma diminuição da temperatura do ar de processo e o consequente aumento da sua humidade relativa, o que resulta que seja necessário reaquecer e desumidificar o ar. A velocidade e a qualidade da secagem são fortemente influenciadas pela temperatura e humidade relativa do ar de secagem.



No caso das rolhas de cortiça é recomendado que a temperatura do ar de secagem esteja entre 40° e 55°C, sendo que este processo de secagem pode levar entre 30 minutos e 24 horas, dependendo do tipo de rolha. O teor de humidade pretendido após a secagem deve variar entre 8% e 16% e a secagem das rolhas de cortiça pode ser realizada em sistemas de secagem naturais, fornos de ar quente com circulação forçada e fornos a vácuo. Nestes últimos, como a pressão no compartimento de secagem é reduzida, o processo de evaporação ocorre a temperaturas mais baixas (Nepomuceno Pereira et al., 2017). Já os grânulos de cortiça, utilizados como matéria-prima na produção de aglomerados, necessitam de um teor de humidade entre 6% e 10%, e a temperatura do ar de secagem deve ser da ordem dos 150 °C. Esse nível de temperatura é conseguido maioritariamente através de um processo de circulação de ar quente forçado, geralmente produzido numa caldeira de combustão (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

### **3.3.2. Processo de aglomeração**

O tratamento térmico associado ao fabrico de compostos aglomerados é geralmente realizado utilizando fornos de ar quente ou sistemas de hiperfrequência. A temperatura de processo para o fabrico de compostos aglomerados varia geralmente entre 110 e 150 °C, sendo que a duração do processo pode variar entre as 4 h e as 22 h, dependendo da mistura de grânulos e do aglutinante. Outro processo de aglomeração possível pode ser através de uma chapa aquecida, entre os 100 °C e os 180 °C, entre 3 a 8 minutos (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

Em relação ao tratamento térmico associado ao processo de aglomeração para o fabrico de rolhas aglomeradas este é muito semelhante ao processo descrito anteriormente, com a ressalva de que a temperatura deve variar entre os 100 e os 130 °C. Já na produção de granulados de cortiça para a produção de aglomerados negros este deve ser realizado através de um tratamento químico em autoclaves, pois permite produzir um material mais homogéneo, com um menor custo de produção e de maneira mais rápida. Este tratamento é efectuado através da injeção de vapor sobreaquecido a uma temperatura entre os 300





°C e os 370 °C, e pode durar entre os 17 e os 30 minutos, a uma pressão que pode ir desde os 30 aos 60 kPa.

No que toca às fontes energéticas utilizadas nas caldeiras de combustão, segundo Gil (1998), estas fontes provêm principalmente do pó de cortiça, mas também de lenha, resíduos florestais ou derivados de petróleo. Para se ter uma ideia das diferentes percentagens de utilização das várias fontes energéticas na indústria da cortiça recorreremos aos relatórios de sustentabilidade do Grupo Amorim, empresa que é líder mundial no sector da cortiça e que em 2005 representava cerca de 30% do processamento mundial de cortiça (Amorim, 2007). Num dos relatórios de sustentabilidade mais recentes deste grupo o consumo total energético da empresa para o ano de 2015 foi de cerca de 1,37 PJ, sendo que este valor apenas diz respeito a 70,1% da actividade económica do grupo empresarial (Amorim, 2016). Deste consumo energético 65% foi satisfeito por biomassa, maioritariamente pelo já referido pó de cortiça<sup>3</sup>, 28% por electricidade, 5% por gás natural e 2% por *diesel* e gás propano remanescente. Daqui fica claro que uma das políticas de sustentabilidade deste grupo empresarial foi a utilização de resíduos de cortiça não adequados para a fabricação de produtos de cortiça para a produção energética em caldeiras de biomassa.

<sup>3</sup>O potencial para incorporar o pó de cortiça em produtos de cortiça é reduzido e como tal este material acaba por ser maioritariamente utilizado como combustível.



## 4. Sistema solar térmico/biomassa para gerar calor de processo na indústria da cortiça

### 4.1. Esquematização do sistema híbrido solar térmico/biomassa

O caso de estudo deste trabalho é a introdução de um sistema de energia solar térmica numa fábrica de produção de rolhas de cortiça natural de alta qualidade que já utilize pó de cortiça como combustível. Definiu-se que o local onde este sistema irá ser instalado e analisado será no concelho de Évora, sendo que foi definido um cenário em que a fábrica labora nos dias úteis das 9 h às 18 h. Para a contabilização do número de dias úteis anuais considerou-se o ano de 2018 (252 dias úteis). Tomou-se como opção fazer a análise da viabilidade tecnoeconómica da introdução de um sistema de energia solar térmica na indústria das rolhas de cortiça pois esta é uma indústria importante dentro da indústria corticeira. Para além disso tem elevadas necessidades de calor de processo, como por exemplo na preparação das pranchas de cortiça, processo que requer temperaturas baixas e onde um sistema solar térmico poderia ser inserido para suprir essas necessidades. O que se propõe é que o sistema solar térmico providencie parte da energia necessária para arrancar o processo de cozedura das pranchas de cortiça (ilustrado na figura 26), elevando a temperatura da água do tanque de cozedura até à temperatura necessária para que o processo se inicie.

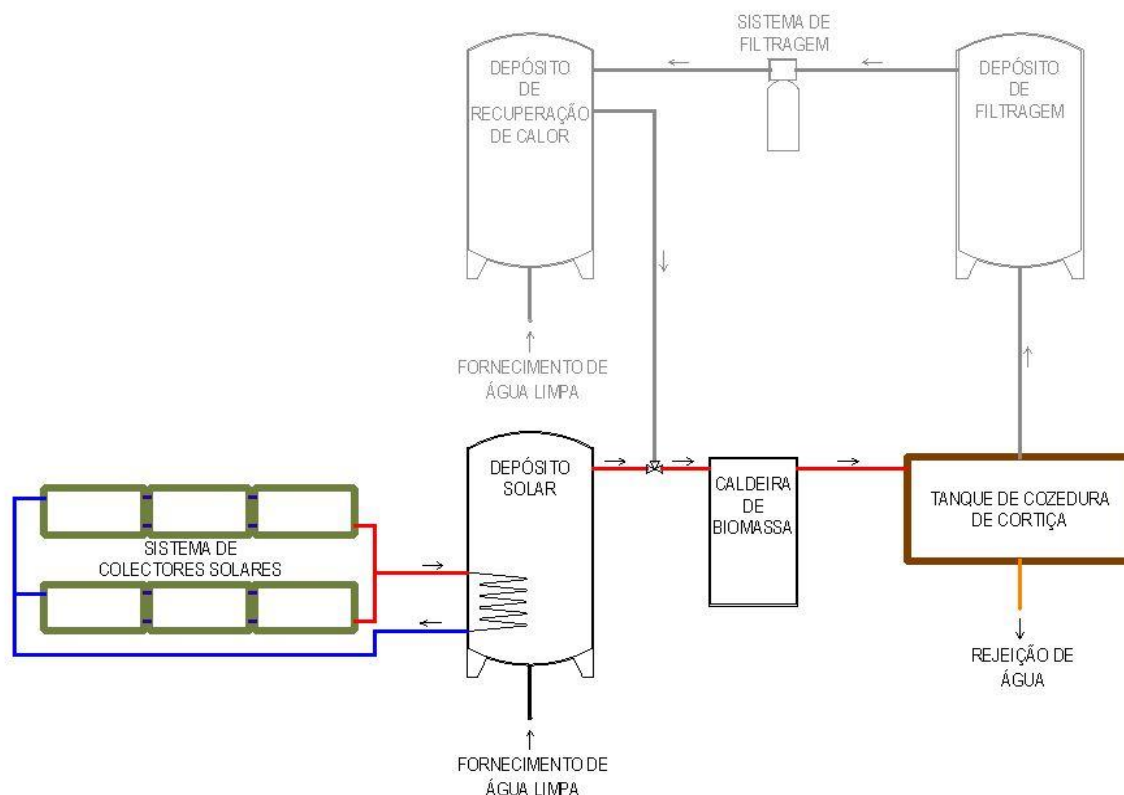


**Figura 26: Processo de cozedura das pranchas de cortiça natural.**

Fonte: <http://www.wineanorak.com>



Na figura 27 pode-se observar o diagrama esquemático do sistema híbrido solar térmico/biomassa proposto, em que a energia necessária ao processo de cozedura das pranchas de cortiça provém do sistema solar térmico e da caldeira de biomassa. No depósito solar entrará água limpa proveniente da rede pública de Évora, que será aquecida através da energia proveniente dos colectores, e utilizada no tanque para o processo de cozedura das pranchas de cortiça. Nos casos em que a energia solar seja insuficiente para atingir a temperatura necessária para o processo ou até mesmo nula, esta terá origem num sistema complementar. Esta energia será proveniente da caldeira de biomassa, através da combustão do pó de cortiça<sup>3</sup>. Os sistemas de combustão do pó de cortiça possuem um estado de maturidade alto, uma vez que são actualmente amplamente difundidos e comercializados. Este sistema complementar será tão necessário consoante a fracção solar do sistema e em que, quanto maior a fracção solar, menor será a utilização da energia proveniente do sistema complementar, e vice-versa.



**Figura 27: Diagrama esquemático do sistema híbrido solar térmico/biomassa proposto.**





Observando a figura 27 pode-se constatar que o campo de colectores irá fornecer energia a um depósito de água quente. Para isso utiliza-se para um fluido de transferência e um permutador de calor. A circulação do campo de colectores para o depósito de armazenamento de água quente será feito através de circulação forçada, utilizando para tal uma bomba circuladora, que é o meio mais indicado quando se tratam de instalações médias ou grandes, como é o caso.

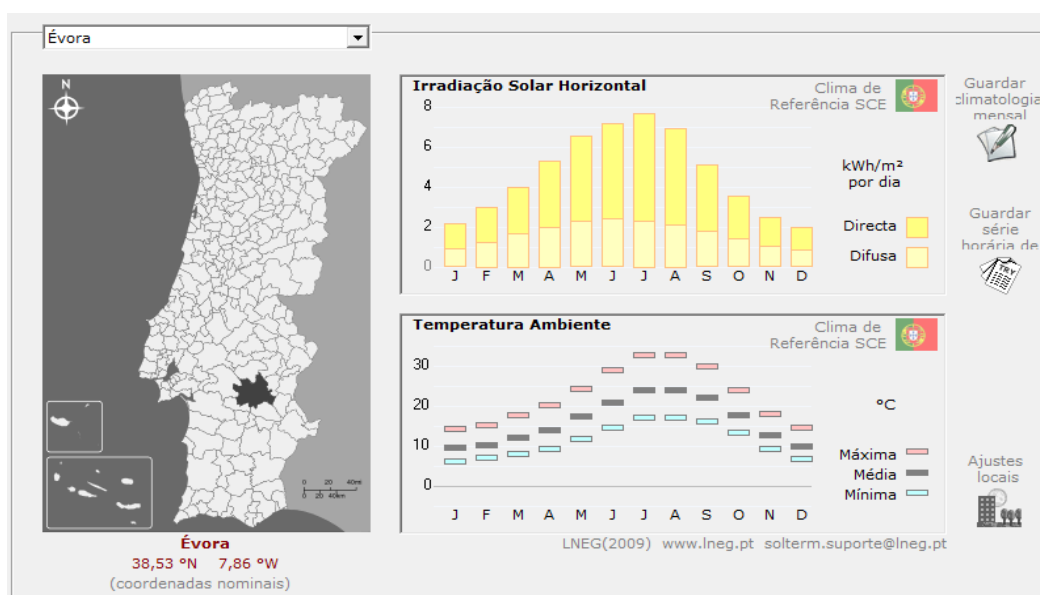
O sistema de energia solar, como já foi referido, será responsável pelo fornecimento da energia necessária para o arranque do processo, ou seja, para a primeira cozedura das pranchas de cortiça do dia. Durante o resto do dia, ao longo dos diversos processos de cozedura que irão ocorrer, a água que não for absorvida pelas pranchas de cortiça ou evaporada durante esse processo, será encaminhada para um depósito de filtração para que seja filtrada, e daí encaminhada para um depósito de recuperação de calor, sendo reaproveitada para o tanque de cozedura. A utilização de filtros de água reduz ou elimina mesmo a concentração de impurezas e bactérias provenientes do processo de cozedura. A esta água de processo devidamente filtrada juntar-se-á a água limpa proveniente da rede pública, de forma a compensar as perdas de água inerentes a cada processo de cozedura das pranchas de cortiça.

No final do dia, depois do último processo de cozedura das pranchas de cortiça estar concluído, a água de processo do tanque de cozedura será totalmente rejeitada. O tanque será abastecido com a totalidade da água necessária para a realização da cozedura das pranchas no dia seguinte, recomeçando novamente o ciclo. Isto porque as regras das boas práticas para a produção de rolhas de cortiça de alta qualidade aconselham a uma renovação diária da água consumida no processo de cozedura (Liège, 2011). Este é um aspecto importante pois uma ineficaz ou ausente renovação da água causará um aumento na concentração de fenóis e, como tal, uma diminuição considerável do rendimento de extracção de compostos indesejáveis. Para além disso, se não houver uma renovação periódica da água, as pranchas de cortiça que estão contaminadas por esses compostos indesejáveis poderão contaminar as restantes, o que não é obviamente desejável. No dimensionamento do sistema solar não será contabilizado o sistema de filtração da água

de processo (e como tal este estar a cinzento na figura 27) pois apenas se considera o fornecimento de energia para o arranque do processo de cozedura.

## 4.2. Dimensionamento do sistema

O *software* utilizado para fazer o dimensionamento do sistema solar térmico proposto foi o SolTerm, programa que permite a análise de desempenho e pré-dimensionamento de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos. Os parâmetros climáticos considerados, essenciais para a análise energética e dimensionamento do sistema, foram a irradiação solar horária global e difusa no plano horizontal e a temperatura ambiente horária. Os valores mensais destes parâmetros podem ser observados na figura 28.



**Figura 28: Principais dados climáticos para o concelho de Évora. Fonte: SolTerm**

Foram escolhidos para o sistema colectores solares planos, pois como já foi referido, esta é uma tecnologia madura e disponível comercialmente. Tendo em conta que as temperaturas necessárias para o processo em estudo são iguais ou inferiores a 100 °C (aplicações a baixas temperaturas), e tal como os resultados apresentados no capítulo 2 demonstraram, a tecnologia de colectores solares planos é a que apresenta menores custos de investimento e de operação e manutenção ao longo do tempo de vida útil do sistema.



O modelo de coletor solar plano escolhido foi o da marca alemã Wagner & Co, modelo Euro L20 AR, que pode ser visto na figura 29 e cujas principais características são apresentadas na tabela 5.



**Figura 29: Coletor solar plano da marca Wagner & CO, modelo Euro L20 AR.**  
Fonte: [www.wagner-solar.com](http://www.wagner-solar.com)

**Tabela 5: Principais características e respectivos valores de referência do modelo L20 AR.**  
Fonte: [www.wagner-solar.com](http://www.wagner-solar.com)

| Características do coletor                              | Valores de referência                  |
|---|--|
| <b>Dimensões (C x L x e)</b>                            | 2151 x 1215 x 110 mm                   |
| <b>Peso</b>   | 48 kg                                  |
| <b>Temperatura máxima de funcionamento</b>              | 219 °C                                 |
| <b>Pressão máxima admissível</b>                        | 10 bar                                 |
| <b>Eficiência instantânea (<math>\eta</math>)*</b>      | 0,85                                   |
| <b>Coefficiente de perdas <math>a_1</math></b>          | 3,46 W/m <sup>2</sup> K                |
| <b>Coefficiente de perdas <math>a_2</math></b>          | 0,0165 W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> |
| <b>Área de abertura</b>                                 | 2,36 m <sup>2</sup>                    |
| <b>Transmissividade (<math>\tau</math>)</b>             | 0,96                                   |
| <b>Absortividade (<math>\alpha</math>)</b>              | 0,95                                   |
| <b>Emissividade do absorsor (<math>\epsilon</math>)</b> | 0,05                                   |
| <b>Volume do absorsor</b>                               | 1,5 l                                  |
| <b>Cargas admissíveis de pressão / sucção</b>           | 2,25 kN/m <sup>2</sup>                 |

\*Eficiência instantânea ( $\eta$ ) - Eficiência se não ocorressem perdas térmicas ( $F' \times \eta_0 = F' \times \tau \times \alpha$ )





O sistema é dimensionado através dos resultados da fracção solar anual das necessidades energéticas e da viabilidade económica do investimento para diferentes volumes de armazenamento, número de colectores e temperaturas de armazenamento.

De seguida explica-se como se dimensionou e calculou o volume dos depósitos de armazenamento de água em função do volume da água de processo. O aço inoxidável foi o material escolhido para revestir os depósitos de armazenamento e a relação entre a altura e o comprimento dos depósitos foi considerada igual a 1,75. O volume do tanque de cozedura das pranchas de cortiça escolhido para este caso de estudo é de  $24 \text{ m}^3$ , com volumes de água de processo de  $14 \text{ m}^3$  (Biencito et al., 2014). A água de processo representa assim cerca de 58% da capacidade volumétrica do tanque, o que faz com que os restantes 42% sejam preenchidos com as pranchas de cortiça natural, perfazendo cerca de 1225 kg de pranchas de cortiça, tendo-se assumido um índice de cozedura (massa de cortiça em bruto por unidade de volume de água de processo) de 87,5 kg de pranchas de cortiça por cada  $\text{m}^3$  de água de processo (Gil, 1998). Assim assume-se como volume mínimo do tanque de armazenamento do sistema solar térmico um valor de  $14 \text{ m}^3$ .

Já tendo o volume mínimo do depósito de armazenamento como ponto de partida, é também essencial na análise tecnoeconómica do sistema avaliar qual a melhor proporção do volume do tanque de armazenamento em função da área de colectores instalados. Foram então definidos para análise, de forma a saber qual seria o mais compensador, tanto do ponto de vista económico como do ponto de vista energético, 3 valores diferentes para o rácio volume de tanque de armazenamento/ área de colectores (volume específico):  $30 \text{ L/m}^2$ ,  $50 \text{ L/m}^2$  e  $70 \text{ L/m}^2$ . Volumes específicos abaixo de  $30 \text{ L/m}^2$  aumentariam bastante a energia solar desperdiçada, enquanto volumes específicos acima de  $70 \text{ L/m}^2$  aumentariam as perdas térmicas associadas ao tanque de armazenamento sem que esse aumento seja compensatório, tanto do ponto de vista de diminuição da energia solar térmica desperdiçada como do ponto de vista económico.



O número de colectores é determinado em função da área total de captação e da área de abertura do modelo de colector escolhido, sendo calculada da seguinte maneira:

$$N^{\circ} \text{ de colectores} = \frac{\text{Área de colectores}}{\text{Área abertura}} = \frac{\text{Volume de armazenamento}}{\text{Área abertura} * \text{Volume específico}}$$

Considerando então os volumes específicos de armazenamento definidos e o volume mínimo do tanque de armazenamento, existe um número mínimo de colectores que terão de ser instalados de forma a garantir que estes 2 constrangimentos são respeitados. Para cada um dos volumes específicos indicados o número mínimo de colectores terá de ser obrigatoriamente os apresentados na tabela 6.

**Tabela 6: Número mínimo de colectores a ser instalado em função do volume específico**

| Volume específico   | Número mínimo de colectores a ser instalado   |
|---------------------|---|
| 30 L/m <sup>2</sup> | $\frac{14000}{2,36 * 30} = 197,7 \approx 200$ |
| 50 L/m <sup>2</sup> | $\frac{14000}{2,36 * 50} = 118,6 \approx 120$ |
| 70 L/m <sup>2</sup> | $\frac{14000}{2,36 * 70} = 84,7 \approx 85$   |

Como se pode observar na tabela anterior o número de colectores para atingir o volume mínimo do tanque de armazenamento (14 m<sup>3</sup>) vai diminuindo à medida que o volume específico de armazenamento aumenta. Para além do número mínimo de colectores definidos na tabela 6 foram analisados mais 4 valores para o número de colectores por cada um dos volumes específicos (resultando valores de armazenamento diferentes para cada um destes valores), valores esses que podem ser vistos na tabela 7.



**Tabela 7: Número de colectores que foram analisados para cada um dos volumes específicos**

| Volume específico   | Número de colectores analisados no dimensionamento |
|---------------------|--|
| 30 L/m <sup>2</sup> | 200,250,500,750,1000                               |
| 50 L/m <sup>2</sup> | 120,200,250,500,750,1000                           |
| 70 L/m <sup>2</sup> | 85,120,200,250,500,750,1000                        |

O SolTerm limita superiormente o valor do volume do depósito de armazenamento do sistema solar, com o volume máximo disponibilizado por este *software* para um depósito a ser inferior ao volume mínimo de armazenamento para este trabalho. Foi então necessário considerar mais do que um depósito, tendo-se definido que os volumes de depósito seriam múltiplos de 1000 litros, e calculou-se o número de depósitos necessários até atingir o volume pretendido para ser analisado. Foi calculada também a área externa que cada depósito de 1000 litros deveria possuir em função do volume final de armazenamento que se pretendia atingir, de forma a que a área externa do tanque de armazenamento correspondesse a apenas um depósito. Isto para que as perdas térmicas finais do depósito de armazenamento, que são calculadas multiplicando o coeficiente de perdas térmicas específico, que foi definido como 1,0 W/m<sup>2</sup>.°C, com a área externa total do depósito, fossem na prática iguais às de um depósito com o volume de armazenamento que se pretende atingir. Os depósitos acumuladores de água requerem também a utilização de permutadores de calor, de forma a que haja uma correcta transferência de calor entre o fluido que circula no circuito primário e o fluido do tanque de armazenamento. Os permutadores de calor dos depósitos de armazenamento deste sistema irão ser exteriores aos depósitos, isto porque para instalações com acumulações de volume de depósito superiores a 3000 litros, é recomendado a utilização de permutadores exteriores, sendo estes normalmente de placas, que possuem uma eficácia de 75% (Lebeña e Costa, 2006).

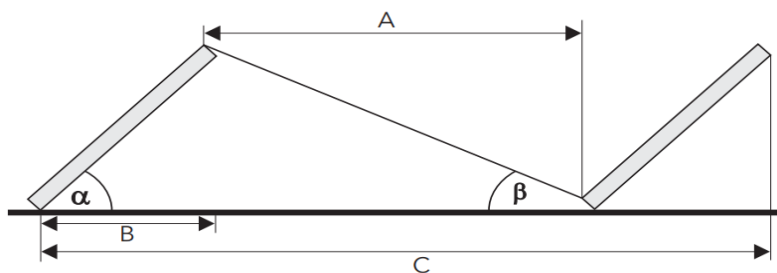
Quanto à orientação e inclinação dos colectores, e de forma a definir estes 2 parâmetros, o SolTerm percorre uma gama de orientações calculando a radiação anual média incidente no colector, onde as obstruções são consideradas, apresentando os resultados numa figura.





O que o SolTerm faz é calcular a energia incidente diária média em função da inclinação e do azimute dos colectores, maximizando o ganho de energia em função destes 2 parâmetros. Os valores de inclinação de  $34^\circ$  e de azimute de  $0^\circ$ , ou seja orientado para sul, foram aqueles onde o ganho de energia foi maior, e portanto foram esses os valores escolhidos. De referir que este valor de inclinação de  $34^\circ$  é o valor óptimo de inclinação em termos de ganhos energético, e coincide com o proposto pela RENAE (Rede Nacional das Agências de Energia), que define que a inclinação óptima dos colectores solares térmicos com consumo regular ao longo do ano é igual à latitude do lugar menos  $5^\circ$  (Latitude de Évora =  $38,53^\circ - 5^\circ = 33,53^\circ = 34^\circ$ ). Este valor óptimo de inclinação maximiza a energia diária média incidente nos colectores instalados em Évora para um valor de  $5,30 \text{ kWh/m}^2$  ao longo do ano.

No dimensionamento de um sistema solar, seja ele térmico ou fotovoltaico, é também muito importante ter em atenção o sombreamento causado pelos colectores. De uma forma geral estes devem ser instalados em locais livres de sombreamentos, e deverá ter-se em consideração não só os obstáculos existentes, como também os que poderão vir a existir no futuro. No caso de uma fileira de colectores deverá garantir-se uma distância mínima entre eles para que um colector não provoque um sombreamento no colector seguinte, e assim sucessivamente. No manual de informação técnica do Euro L20 AR, disponibilizado pela marca fabricante Wagner & Co, podemos encontrar uma tabela para evitar os sombreamentos entre os colectores, definindo as distâncias mínimas entre estes, baseadas num ângulo de sombreamento  $\beta$ , como se pode ver na figura 30, e para diferentes valores do ângulo de inclinação  $\alpha$  dos colectores.



**Figura 30: Distâncias mínimas entre os colectores para evitar sombreamento.**



Fonte: [www.wagner-solar.com](http://www.wagner-solar.com)



O valor de latitude em que foram baseados os cálculos para as distâncias mínimas entre os colectores, dado pelo manual de informação técnica, é de 40,39°, um valor ligeiramente superior para a latitude do concelho de Évora, que é de 38,53°. Quanto maior a latitude do local de instalação dos colectores maior vai ter de ser a distância mínima entre estes, de forma a evitar o seu sombreamento. Isto permite aferir que as distâncias mínimas para os colectores serão ligeiramente inferiores para o concelho de Évora do que em relação ao local com a latitude indicada, mas essa diferença será pouco expressiva (na ordem de poucos cm), e se os valores de distância entre colectores tabelados forem respeitados, o sombreamento entre estes será, seguramente, evitado com sucesso. Como os colectores irão ser instalados com uma inclinação de 34° e com uma colocação horizontal, as distâncias mínimas entre colectores para esta instalação irão ser as da primeira coluna da tabela 8, para um valor de inclinação de 35°.

**Tabela 8: Distâncias mínimas entre colectores de forma a evitar sombreamentos.**

Fonte: [www.wagner-solar.com](http://www.wagner-solar.com)

| Distâncias mínimas entre colectores de forma a evitar sombreamentos (m) |  |       |       |  |       |       |
|---|--|-------|-------|--|-------|-------|
| Distâncias<br>(ver fig.30)  | Ângulo de inclinação $\alpha$  |       |       |  |       |       |
|   | Colocação horizontal  |       |       | Colocação vertical  |       |       |
|   | 35°  | 45°   | 50°   | 35°  | 45°   | 50°   |
| <b>A</b>  | 1,391  | 1,715 | 1,858 | 2,463  | 3,036 | 3,289 |
| <b>B</b>  | 0,995  | 0,859 | 0,781 | 1,762  | 1,521 | 1,383 |
| <b>C</b>  | 3,381  | 3,433 | 3,420 | 5,986  | 6,078 | 6,054 |

De forma a fazer um correcto dimensionamento do sistema é necessário também que se definam determinados parâmetros no que toca à circulação do fluido de transferência térmica no circuito primário, designadamente o seu caudal e a composição da mistura água-anticongelante, solução utilizada para proteger os colectores do perigo de congelação.



Para o cálculo do caudal do fluido no circuito primário é necessário ter em conta a temperatura requerida para o processo em causa e a percentagem de anticongelante presente na mistura. O principal efeito deste, do ponto de vista dos balanços energéticos, é aumentar ligeiramente a temperatura no circuito primário, promovendo as perdas térmicas. Outro efeito do anticongelante é a redução da massa volúmica do fluido no circuito primário e o aumento da viscosidade, que aumentará por consequência as perdas de carga no circuito, modificando assim as condições de funcionamento da bomba, com efeitos no caudal do fluido circulante. A percentagem de anticongelante no fluido que circula no circuito primário deve depender da temperatura mínima esperada durante o tempo de vida do sistema. Para Portugal valores extremos abaixo de  $-10^{\circ}\text{C}$  são raros, o que corresponde tipicamente a 25% de anticongelante na mistura, que foi o valor utilizado para este trabalho (Aguiar e Coelho, 2012). De realçar que com o aumento da fracção de anticongelante na mistura haverá uma diminuição do calor específico ( $C_p$ ) do fluido, contudo o desempenho global do sistema acaba por não ser muito afectado por este parâmetro. O etileno glicol é um exemplo de um composto químico comumente utilizado como anticongelante. Este composto é incolor, inodoro e completamente miscível com a água, sendo que são precisas algumas precauções no seu manuseamento, dado que o seu grau de toxicidade é relativamente alto. O  $C_p$  do fluido circulante no circuito primário em função do valor da mistura de anticongelante que foi definido e do valor de temperatura mais adequada ao processo foi obtido de (Ticona, 2003).

Obtido o calor específico do fluido, o caudal mássico específico de circulação do fluido ( $Q_e$ ) nos colectores poderá ser calculado recorrendo à seguinte equação (Lebeña e Costa, 2006):

$$Q_e = \frac{10 * F' U_L}{C_p} [\text{L}/(\text{h} * \text{m}^2)]$$

em que  $Q$  é o caudal específico de circulação do fluido,  $F'$  é denominado por factor de irrigação e é dependente do caudal do fluido e das características da placa absorvedora do colector, e  $U_L$  o coeficiente global de perdas do colector.





O próximo passo para fazer um correcto dimensionamento do sistema será calcular o comprimento e o diâmetro das tubagens onde circulará o fluido. O comprimento das tubagens varia de instalação para instalação e depende do espaço interior e exterior que cada uma apresente. Para o comprimento das tubagens do circuito primário foi definido neste dimensionamento um valor fixo e constante de 80 m, com um percurso interior no edifício de 35 metros e um percurso exterior de 45 metros. O material escolhido para as tubagens do sistema será o cobre, que possui uma condutividade térmica de 372 W/mK. Por o cobre ser tecnicamente adequado e economicamente competitivo, resistente à corrosão, ar ou humidade, é amplamente utilizado como material para tubagens. A sua maleabilidade e ductilidade permitem também uma cómoda manipulação e uma grande facilidade para realizar traçados complicados, tendo também como grande vantagem o facto de poder ser curvado, evitando assim a utilização de acessórios e correspondentes aumentos das perdas de carga localizadas.

No dimensionamento das tubagens do circuito também é essencial calcular o diâmetro que estas irão apresentar. Este diâmetro está directamente relacionado com o caudal circulante nas tubagens e com a velocidade dos fluidos, e pode ser calculado através de:

$$Q = \pi * \left(\frac{d^2}{4}\right) * v$$

em que  $Q$  é o caudal volumétrico circulante da bomba,  $d$  o diâmetro interior do tubo e  $v$  a velocidade do fluido.

Quanto maior o caudal de circulação específico do colector maior será o caudal de circulação de bomba e consequentemente a velocidade do fluido no circuito primário. De realçar que o aumento do caudal de circulação da bomba aumenta consequentemente a transferência de calor, mas também a potência consumida pela bomba. A partir de um certo valor de caudal não é compensatório aumentá-lo mais dado que o ganho térmico deixa de ser compensador. A área de colectores determinada irá influenciar também o caudal da bomba circuladora, na medida em que quanto maior o número de colectores, e consequentemente maior a área total destes, maiores será a potência da bomba. De realçar



o facto de o dimensionamento das tubagens ter que ter em conta que no circuito primário a velocidade máxima recomendada no fluido é de 1,5 m/s, de forma a garantir baixas perdas de carga por atrito (Lebeña e Costa, 2006). Tendo em conta este facto pode-se então calcular o diâmetro nominal mínimo para que esta restrição seja respeitada, utilizando para tal o valor de caudal de circulação definido:

$$Q = \pi * \left( \frac{d_{\min}^2}{4} \right) * v_{\max} \Leftrightarrow d_{\min} = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * 1,5}} \quad (\text{m})$$

O caudal do circuito secundário, segundo Lebeña e Costa (2006), deve ser igual a 75% do caudal do circuito primário, de forma a não prejudicar a estratificação dos depósitos acumuladores.

As tubagens terão também de possuir um isolamento, de maneira a que sejam minimizadas as perdas térmicas associadas, aumentando assim a eficiência do sistema. O tipo de material normalmente escolhido para o efeito é a lã de rocha pois é um material energeticamente eficiente e com um excelente desempenho acústico, resistindo a temperaturas com amplitudes térmicas extremas (de -200° C a +800°C). Para além disto é resistente ao fogo, sendo um material de fácil e rápida instalação, e um produto inofensivo para a saúde, pois não origina substâncias agressivas ou contaminantes. Este material possui uma condutividade térmica de 0,040 W/mK (Lebeña e Costa, 2006).

Para fazer o dimensionamento correcto das tubagens é necessário saber também a espessura mínima do isolamento que estas terão, e para isso recorreremos à tabela 9. Nesta tabela podem-se observar valores de espessuras de isolamento, em função do diâmetro das tubagens, para valores de condutividade térmica de 0,04 W/mK, ou seja, para um isolamento com lã de rocha.



**Tabela 9: Valores de espessura de isolamento das tubagens, em função do seu diâmetro. Fonte: Lebeña e Costa (2006)**

| Diâmetro da tubagem (mm)  | Espessura do isolamento (mm) |
|---------------------------|------------------------------|
| <b>D &lt; 35</b>          | 20                           |
| <b>36 &lt; D &lt; 50</b>  | 20                           |
| <b>51 &lt; D &lt; 80</b>  | 30                           |
| <b>81 &lt; D &lt; 125</b> | 30                           |
| <b>126 &lt; D</b>         | 40                           |

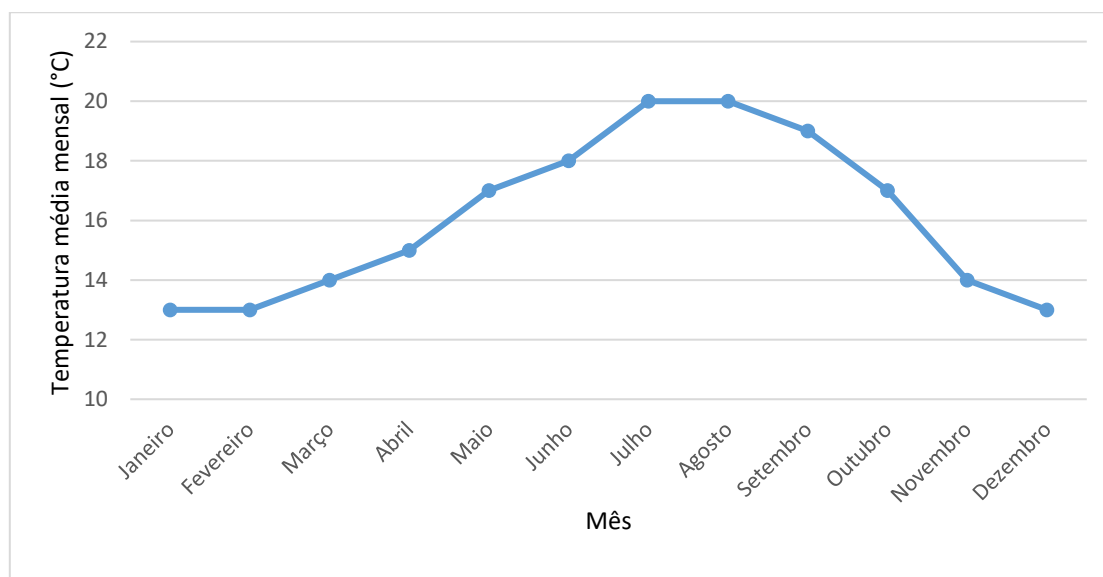
A espessura de isolamento das tubagens será então definida em função do diâmetro que estas apresentam, anteriormente calculado. As perdas térmicas totais da tubagem, que terão impacto no rendimento total do sistema, são então em função de todos os parâmetros descritos anteriormente, nomeadamente do comprimento da tubagem, e do quanto esta está no interior ou no exterior do edifício, do seu diâmetro nominal e da sua espessura, e da condutividade térmica do material que tem como função fazer o isolamento da tubagem, para além da espessura do material de isolamento. O rendimento do sistema será então mais baixo quantos maiores forem os valores das perdas térmicas totais da tubagem, e vice-versa.

No dimensionamento do sistema também é essencial compreender se é mais viável energética e financeiramente o aquecimento da água que irá ser necessária para a cozedura das pranchas de cortiça natural até à temperatura de processo (requerendo este processo temperaturas na ordem dos 100 °C), ou se por outro lado, é mais viável energética e financeiramente o pré-aquecimento dessa água a uma determinada temperatura mais baixa, com o sistema complementar a fornecer o calor necessário para aquecer a água dessa temperatura até à temperatura requerida pelo processo. Definiu-se então que na análise da viabilidade tecnoeconómica deste sistema as temperaturas para o aquecimento ou pré-aquecimento da água seriam 99 °C (temperatura máxima disponível no software SolTerm), 80 °C e 60 °C, e toda a análise subsequente seria feita em função desta gama de temperaturas. O abastecimento de água será feito com água da rede pública de Évora,





cujas temperaturas mensais podem ser vistas na figura 3. Cada valor de temperatura que se deseja alcançar com o sistema solar térmico representa uma carga térmica diferente, que pode ser observada na tabela 10.



**Figura 31: Temperaturas mensais da água de abastecimento da rede pública de Évora.**

**Fonte: SolTerm**

**Tabela 10: Carga térmica energética do sistema solar térmico em função da temperatura de fornecimento**

| Temperatura de fornecimento (°C) | Carga energética anual requerida (kWh/ano) |
|----------------------------------|--|
| 99                               | 351 966                                    |
| 80                               | 271 239                                    |
| 60                               | 186 263                                    |

Outro ponto essencial no dimensionamento do sistema solar térmico é a definição de que tipo de sistema energético complementar terá o sistema, nos casos em que a radiação solar é insuficiente ou mesmo inexistente, de forma a garantir sempre um fornecimento contínuo para as cargas energéticas do sistema. Como já foi dito anteriormente, a energia complementar do sistema será proveniente da biomassa, através do pó de cortiça, um resíduo gerado pela própria indústria da cortiça. É necessário definir algumas



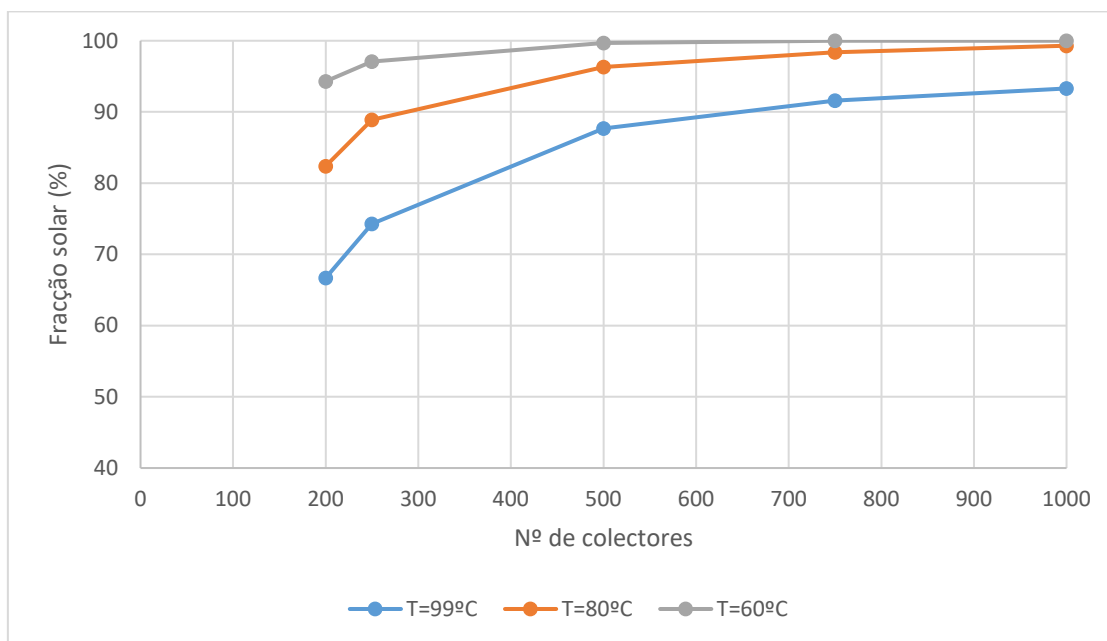
características energéticas relativamente ao pó de cortiça para o dimensionamento do sistema complementar, designadamente o seu poder calorífico inferior (PCI), que é de 18,87 MJ/kg e o rendimento global da caldeira de combustão do pó de cortiça, que é de 80 % (Nepomuceno Pereira et al., 2017).

### **4.3. Análise energética do sistema proposto**

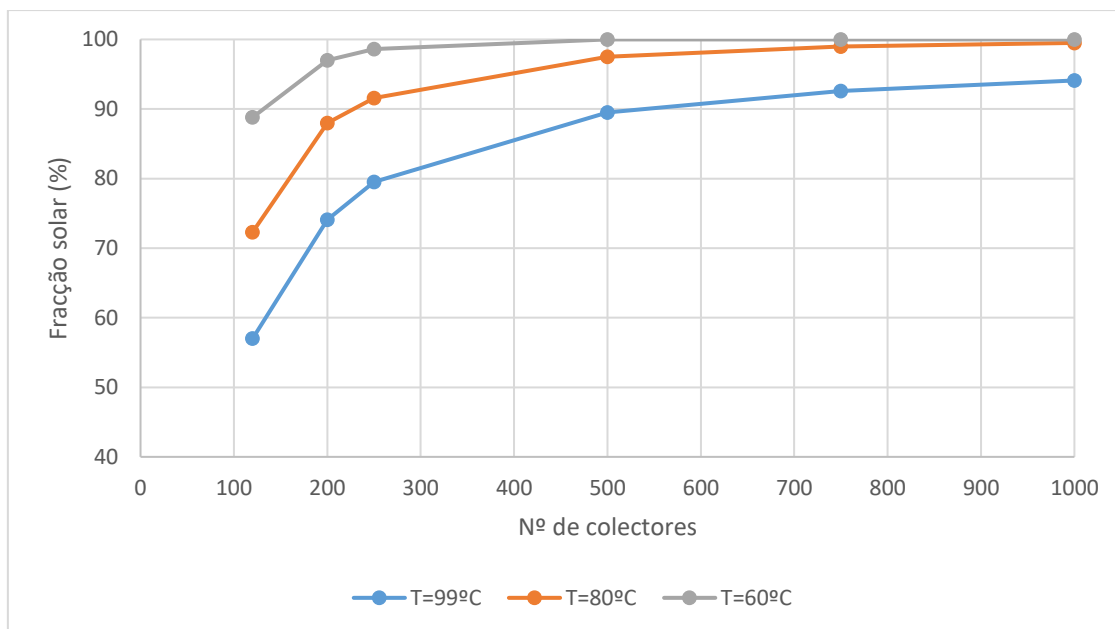
Neste capítulo serão analisados e comparados os resultados das análises energéticas dos diferentes casos definidos no subcapítulo anterior, tendo-se para isso recorrido ao SolTerm. O objectivo principal desta análise será o de procurar o cenário que maximize a fracção solar do sistema, ao mesmo tempo que se minimiza o investimento económico necessário para a instalação e manutenção do mesmo. Apresentam-se como indicadores do desempenho do sistema solar a energia fornecida pelo sistema solar térmico e a fracção solar anual da carga anual requerida pelo processo.

No que toca à fracção anual do sistema este parâmetro deverá possuir valores entre 40% e 90%, que são os indicados e os que se procuram atingir nos sistemas solares térmicos (Aguiar e Coelho, 2012). Um valor de fracção solar inferior a 40% poderá indicar um sistema subdimensionado, enquanto um valor superior a 90% poderá indicar um sobredimensionamento. Quanto maior a fracção solar, para uma determinada carga térmica, maior terá de ser a área instalada de colectores, e o volume de depósito de água quente (diminuindo a energia desperdiçada pelo sistema, aumenta-se o valor útil de energia fornecida pelo sistema solar, e como tal, a fracção solar também aumentará), o que implicará um investimento económico mais dispendioso também. O ponto-chave será então determinar a fracção solar e o volume de depósito de água quente adequados ao sistema solar proposto, dentro de um orçamento que se considere adequado também.

Nas figuras 32, 33 e 34 podemos observar para o sistema em estudo a variação da fracção solar em função do número de colectores para diferentes volumes específicos de armazenamento e para cada uma das diferentes temperaturas de fornecimento.

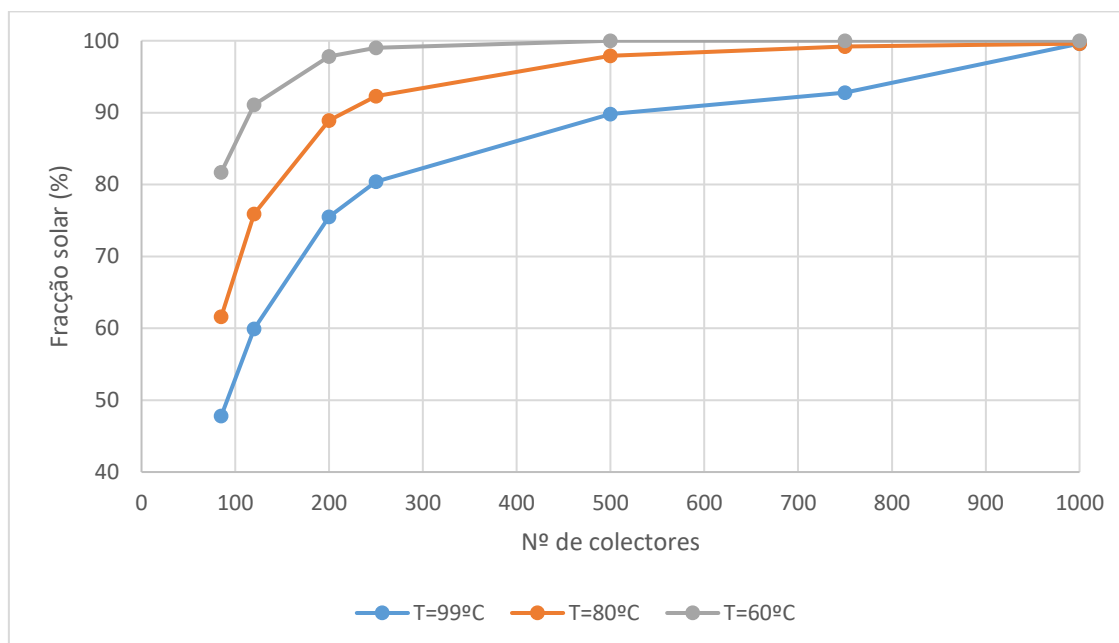


**Figura 32:** Fracção solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 30 L/m<sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento



**Figura 33:** Fracção solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 50 L/m<sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento

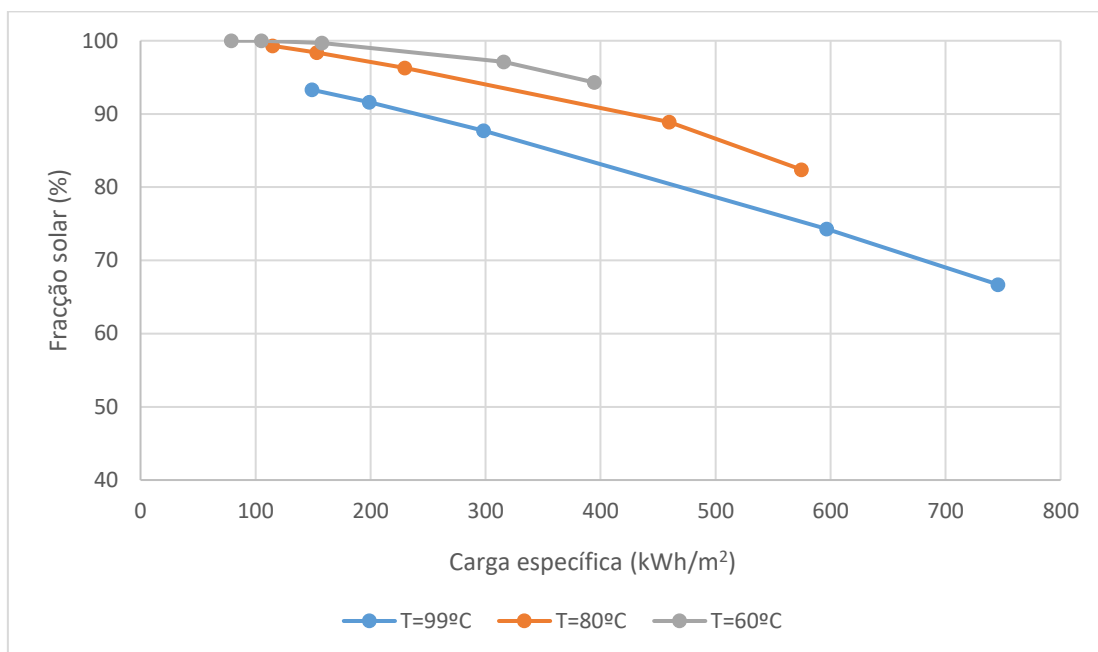




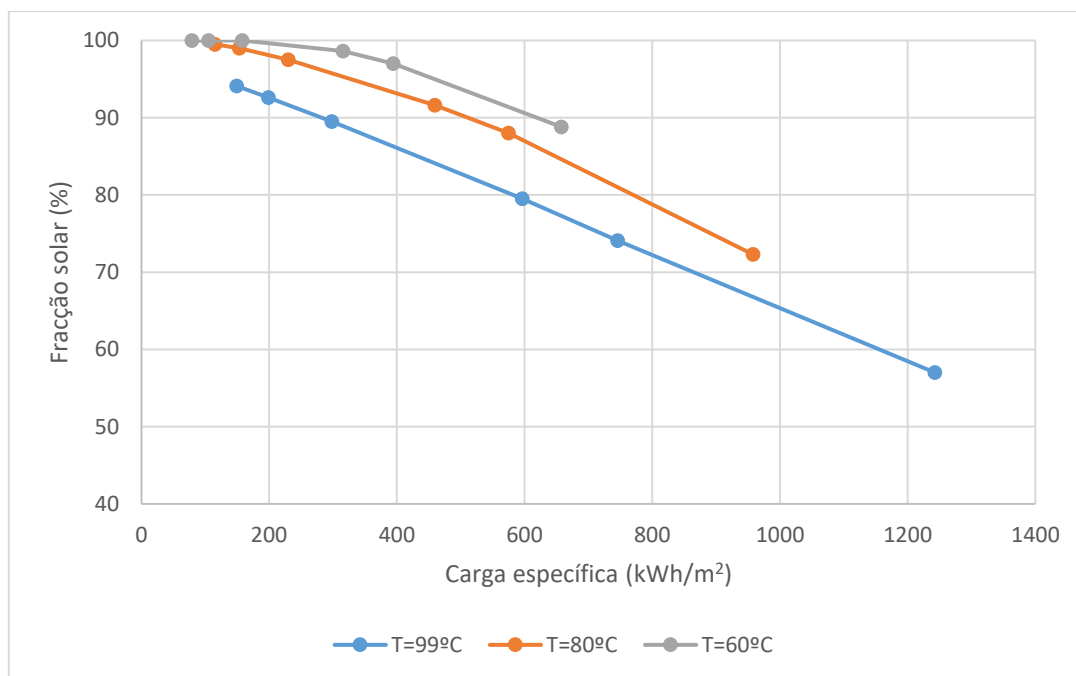
**Figura 34: Fração solar em função do número de colectores para um volume específico de armazenamento de 70 L/m<sup>2</sup> e diferentes temperaturas de fornecimento**

Nas figuras anteriores podemos observar que, para qualquer valor de volume específico de armazenamento, a fracção solar do sistema vai aumentando à medida que o número de colectores também aumenta. As diferenças nos valores de fracção solar para várias temperaturas de água de processo, para o mesmo número de colectores, vão ficando mais reduzidas à medida que o número de colectores aumenta. Quanto maior for o volume específico de armazenamento, maiores irão ser também os valores da fracção solar, para o mesmo número de colectores. O que pode ser observado em todos os figuras é que a fracção solar anual nunca é inferior a 40 %, e como já foi referido, valores de fracção solar anual entre os 40% e os 90% são valores aceitáveis (Aguiar e Coelho, 2012).

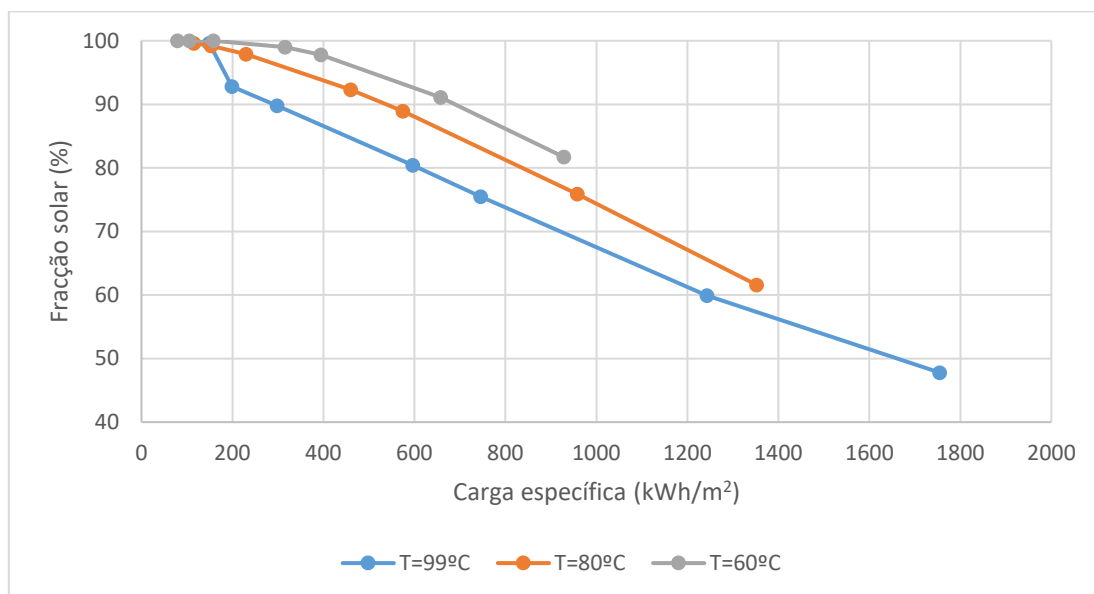
A carga específica dos colectores representa a carga que cada colector terá de apresentar para satisfazer a carga total do sistema, calculando-se dividindo a carga anual requerida pelo sistema pela área total de colectores instalados. Nas figuras 35, 36 e 37 podemos observar a variação da fracção solar em função da carga específica dos colectores para diferentes valores de temperatura de fornecimento e para cada um dos diferentes volumes específicos.



**Figura 35:** Fração solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 30 L/m² e diferentes temperaturas de fornecimento



**Figura 36:** Fração solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 50 L/m² e diferentes temperaturas de fornecimento

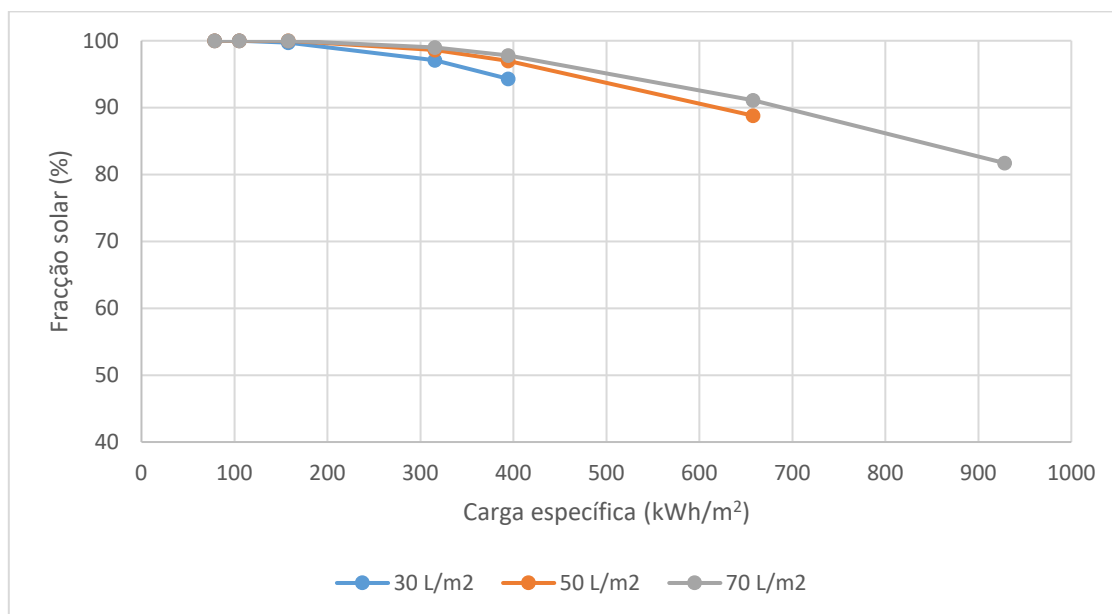


**Figura 37: Fração solar em função da carga específica dos colectores para um volume específico de armazenamento de 70 L/m² e diferentes temperaturas de fornecimento**

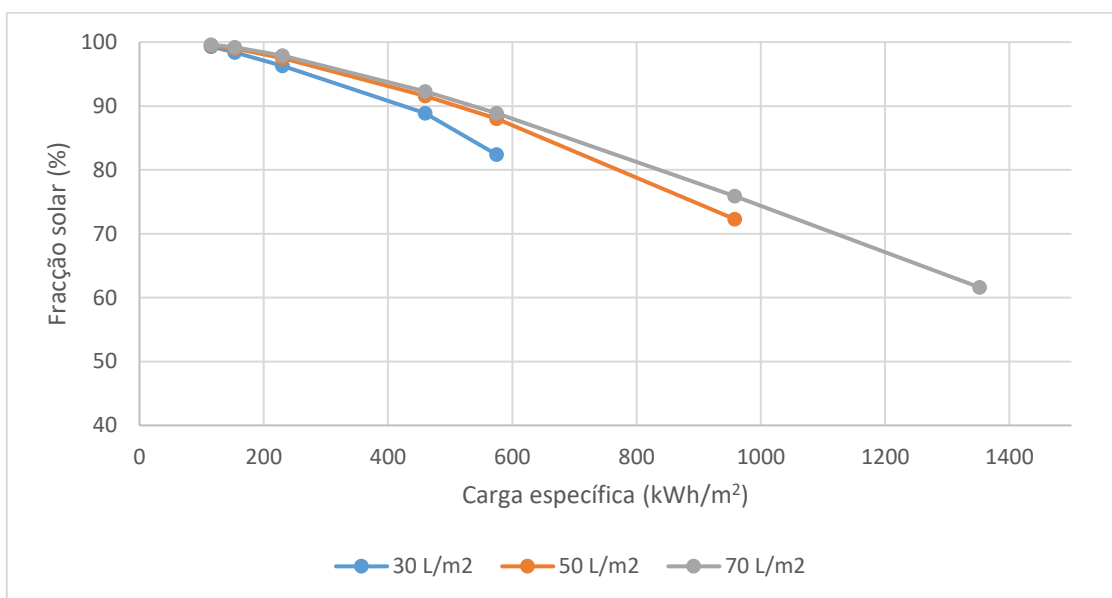
Como pode ser observado nas figuras anteriores, e de acordo com o que já era previsto, a fracção solar vai diminuindo à medida que a carga específica vai aumentando. A fracção solar também diminui à medida que a temperatura da água fornecida pelo sistema solar para a cozedura das pranchas de cozedura vai aumentando, pois a carga que cada colector tem de satisfazer vai aumentando em consequência.

Nas figuras 38, 39 e 40 podemos observar a variação da fracção solar em função da carga específica dos colectores para diferentes volumes específicos e para cada um dos diferentes valores de temperatura de fornecimento.

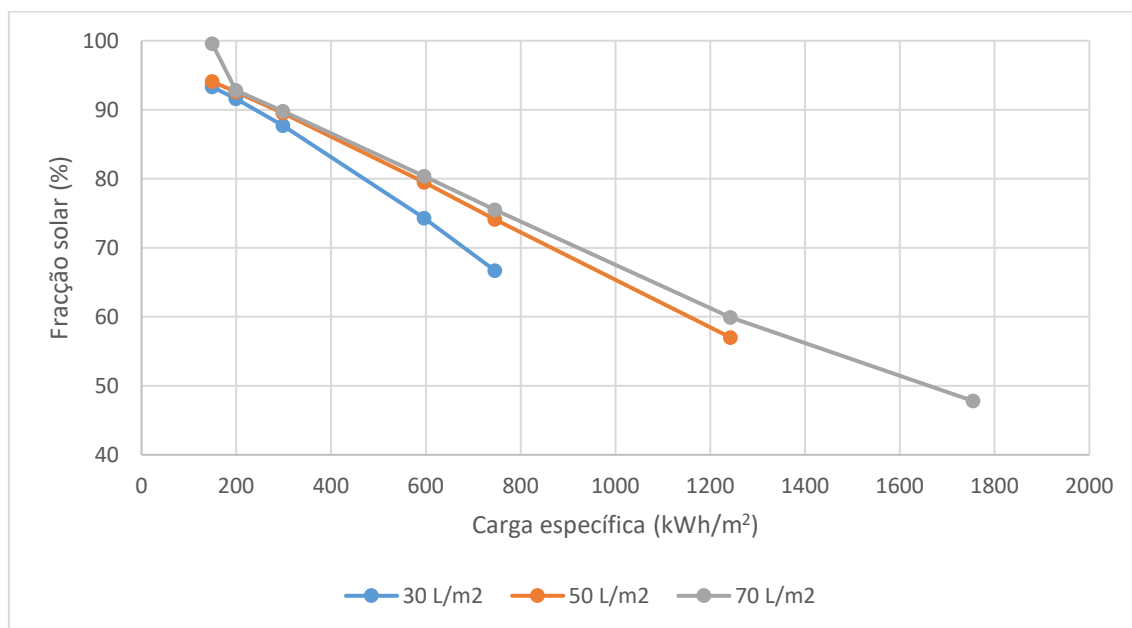




**Figura 38:** Fracção solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 60°C e diferentes volumes específicos



**Figura 39:** Fracção solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 80°C e diferentes volumes específicos



**Figura 40: Fração solar em função da carga específica dos colectores para uma temperatura de água de processo de 99°C e diferentes volumes específicos**

Através das figuras anteriores podemos concluir que as diferenças entre as fracções solares para diferentes volumes específicos de armazenamento começam a ser maiores à medida que a temperatura da água fornecida ao processo pelo sistema solar aumenta. Por exemplo na figura 38 (fracção solar em função da carga específica para água fornecida a 60°C), para os diferentes volumes específicos de armazenamento, as diferenças entre os pontos presentes na figura são reduzidas, e para uma carga específica baixa e fracção solar alta estes praticamente se sobrepõem entre si. O volume específico de armazenamento igual a 70 L/m<sup>2</sup> também possui sempre valores iguais ou superiores de fracção solar comparativamente aos outros volumes específicos de armazenamento, para a mesma carga específica. Este efeito é explicável pelo facto de um volume de armazenamento superior (até um certo limite, porque a partir daí as perdas térmicas associadas ao armazenamento serão cada vez mais elevadas e já não compensarão esse aumento do volume de armazenamento) implicar um menor desperdício da energia fornecida pelo sistema solar, e como tal um maior aproveitamento deste, aumentando assim a fracção solar do sistema. Este fenómeno é mais evidente à medida que a temperatura de água fornecida pelo sistema solar aumenta, embora também haja um maior gasto energético para aquecer a água de processo com volumes de armazenamento maiores. Para



temperaturas de água fornecidas ao processo mais baixas o aumento do volume de armazenamento não é compensatório, pois para além de aumentar o gasto energético para aquecer a água, irá ter pouca influência no valor da fracção solar do sistema.

Depois de analisadas as figuras das diferentes simulações de cenários possíveis para o sistema solar, há que definir o número de colectores e o volume específico de armazenamento que este terá. Neste trabalho o número de colectores e o volume específico de armazenamento foram escolhidos de forma a que o sistema fosse o mais competitivo economicamente, garantindo ao mesmo tempo que fosse capaz de fornecer um valor de energia anual que faça com que a sua implementação seja compensadora em termos energéticos. Como todas as simulações estão dentro da gama de fracções solares que se consideram como valores aceitáveis (40% a 90%), o critério para a escolha do número de colectores e do volume específico de armazenamento foi meramente económico. Para que o sistema solar tenha o menor custo de investimento possível, terá de ter o menor número de colectores possível. Definiu-se então que o número de colectores será de 85, com uma área total de cerca de 200 m<sup>2</sup>, pois este número de colectores garante que o volume de armazenamento mínimo do sistema (14 m<sup>3</sup>) é respeitado, sendo que o volume de armazenamento específico que permite este número de colectores corresponde a 70 L/m<sup>2</sup>. Foram feitas simulações com o número de colectores e volume específico escolhido para as diferentes temperaturas de fornecimento em análise e verificou-se que a temperatura de 99°C era a mais competitiva em termos económicos. Assim sendo, e para este valor de temperatura, o sistema solar possui uma fracção solar de 47,8%, fornecendo praticamente metade dos 351 966 kWh da carga, o que é um valor bastante satisfatório e que torna a instalação do sistema solar compensatória em termos energéticos. Possui também uma produtividade, uma energia específica definida como a energia de origem solar fornecida para consumo por unidade de área dos colectores, de 838 kWh/m<sup>2</sup> de colector, que se trata de um valor bastante satisfatório também.





O rendimento global anual do sistema, definido como a razão entre a energia de origem solar fornecida para consumo e a disponível à face dos colectores (portanto uma medida de eficácia do sistema solar em transferir energia da radiação solar para a carga), apresenta um valor de 43%. Este é um valor de rendimento global bastante satisfatório e que indica que o sistema foi bem dimensionado, pois um sistema bem dimensionado terá tipicamente rendimentos entre 20% e 30%, conforme as características do clima e da carga térmica (Aguiar e Coelho, 2012). O rendimento global anual é uma indicação do dimensionamento do sistema bastante útil e interessante, embora não seja habitualmente apresentada quando se trata de dimensionamentos, pois é menos dependente dos detalhes do consumo, e em particular menos do nível de recurso solar, do que indicações como a fracção solar ou a produtividade.

A análise económica e ambiental que se seguem foram realizadas para o cenário escolhido, em que a temperatura de fornecimento é 99°C, o volume específico do depósito de armazenamento é 70 L/m<sup>2</sup> e o número de colectores é 85.

#### **4.4. Análise do impacto ambiental do sistema híbrido**

A análise do impacto ambiental da implementação do sistema solar térmico vai ser medida através dos gases com efeito de estufa (GEE) evitados pelo sistema solar térmico. Uma vez que a operação do sistema solar não conduz a emissões de GEE, mas a do sistema a biomassa sim, é necessário calcular então o valor das emissões de GEE anuais que o pó de cortiça emite ao ser utilizado como combustível no sistema proposto. Interessa então calcular o valor do factor de emissão de GEE da queima da biomassa, para saber o valor das emissões de GEE anuais que o pó de cortiça emite ao ser utilizado como combustível. Irá ser feita também uma análise às emissões de GEE evitadas pelo sistema híbrido solar térmico/biomassa, comparativamente a se o sistema tivesse como fonte de combustível o gás natural, um dos combustíveis fósseis mais utilizados na indústria da cortiça (Amorim, 2016).



O factor de emissão (*Emission Factor* [*EF*]) de GEE de um determinado tipo de combustível pode ser calculado pela seguinte expressão (RETSscreen, 2005):

$$EF_{biomassa} = GWP_{CO_2} * EF_{CO_2} + GWP_{CH_4} * EF_{CH_4} + GWP_{N_2O} * EF_{N_2O}$$

Onde  $EF_{CO_2}$  é o factor de emissão para o  $CO_2$  (kg/GJ),  $EF_{CH_4}$  é o factor de emissão para o  $CH_4$  (kg/GJ),  $EF_{N_2O}$  é o factor de emissão para o  $N_2O$  (kg/GJ),  $GWP_{CO_2}$  é o potencial de aquecimento global de GEE para o  $CO_2$ ,  $GWP_{CH_4}$  é o potencial de aquecimento global de GEE para o  $CH_4$  e  $GWP_{N_2O}$  o potencial de aquecimento global de GEE para o  $N_2O$ .

Para a queima do pó de cortiça, os valores dos factores de emissão para a equação apresentada são os seguintes:  $EF_{CO_2} = 0$  (kg/GJ),  $EF_{CH_4} = 0,0320$  (kg/GJ) e  $EF_{N_2O} = 0,0040$  (kg/GJ) (RETSscreen, 2005). Os valores de  $GWP$  para os gases considerados, para um horizonte temporal de 100 anos, são então os seguintes:  $GWP_{CO_2} = 1$ ,  $GWP_{CH_4} = 28$  e  $GWP_{N_2O} = 265$  (IPCC, 2014). Logo o factor de emissão de GEE da biomassa possui o seguinte valor:

$$EF_{biomassa} = 1 * 0 + 28 * 0,0320 + 265 * 0,0040 = 1,956 \text{ g CO}_2 \text{ Eq/MJ}$$

Multiplicando agora o valor do factor de emissão da biomassa com a energia fornecida pelo sistema complementar para a carga térmica requerida pelo sistema ao longo do ano, calcularemos então o valor das emissões de GEE do pó de cortiça como um combustível em termos anuais. A eficiência da caldeira de combustão da biomassa, segundo Nepomuceno Pereira et al. (2017), é de 80%, portanto a energia fornecida por este tipo de combustível é de:

$$\text{Energia fornecida pela biomassa} = \frac{0,522 * 351966 * 3,6}{0,8} = 826\,768 \text{ MJ/ano}$$



Logo:

$$\text{Emissões GEE}_{\text{biomassa}} = 826\,768 * 1,956 = 1\,617\,158 \text{ g CO}_2 \text{ eq/ano}$$

Este é um valor de emissão de GEE bastante baixo, mas importa também estimar as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pelo sistema, comparativamente a se o sistema tivesse como fonte de combustível o gás natural, calculando para tal as emissões de GEE deste tipo de gás. Os valores dos factores de emissão para o cálculo do factor de emissão do gás natural são os seguintes:  $EF_{\text{CO}_2} = 56,1$  (kg/GJ),  $EF_{\text{CH}_4} = 0,0030$  (kg/GJ) e  $EF_{\text{N}_2\text{O}} = 0,0010$  (kg/GJ) (RETScreen,2005). Logo:

$$EF_{\text{gás natural}} = 1 * 56,1 + 28 * 0,0030 + 265 * 0,0010 = 56,449 \text{ g CO}_2 \text{ Eq/MJ}$$

Como a eficiência da caldeira de combustão do gás natural, segundo Bhatia (2012), é de 85 %, logo a energia fornecida por este tipo de combustível é a seguinte:

$$\text{Energia fornecida pelo gás natural} = \frac{351966 * 3,6}{0,85} = 1490\,679,5 \text{ MJ/ano}$$

Logo:

$$\text{Emissões GEE}_{\text{gás natural}} = 1490\,679,5 * 56,449 = 84\,147\,367 \text{ g CO}_2 \text{ eq}$$

$$\leftrightarrow \text{Emissões GEE}_{\text{gás natural}} = 84,1 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Assim as emissões de GEE evitadas pelo sistema híbrido solar térmico/biomassa, comparativamente a se o sistema tivesse como fonte de combustível o gás natural, são as seguintes:

$$\text{Emissões GEE}_{\text{evitadas}} = 84\,147\,367 - 1\,617\,158 = 82\,530,2 \text{ g CO}_2 \text{ eq}$$

$$\leftrightarrow \text{Emissões GEE}_{\text{evitadas}} = 82,5 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$





## 5. Análise de viabilidade económica do sistema híbrido proposto

### 5.1. Cenário e resultados económicos do sistema

Neste subcapítulo irão ser definidos os parâmetros e critérios de análise económica ao sistema, de forma a criar e avaliar um cenário financeiro o mais aprofundado e realista possível. É assumido que o tempo médio de vida útil de um sistema solar térmico é de cerca de 25 anos, e, portanto, todos os cenários económicos do sistema serão projectados para este período temporal (Rosa e Tiago Filho, 2007).

O método usado para fazer a análise económica do sistema foi o DCF, *Discounted cash flow method* (método do Fluxo de Caixa Descontado), e dentro deste método foram analisados dois parâmetros de análise financeira:

- VAL (Valor Actualizado Líquido), que traduz o resultado final do investimento realizado, sendo a soma de todas as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil de um projecto, actualizada para o momento presente.
- Período de retorno de investimento simples, que se trata do período de tempo para que as receitas igualem ou superem as despesas e o investimento feito se encontre devidamente amortizado.

A análise económica foi efectuada no SolTerm, sendo que têm de ser definidos três parâmetros para realizar esta análise ao longo da vida útil do sistema: inflação, deriva do preço da energia substituída e rendimento de aplicação financeira segura.

Como existe uma elevada incerteza na previsão da inflação, definiu-se que este parâmetro seria constante ao longo da vida útil do sistema. Foi definido também que o valor de inflação seria o valor deste parâmetro para Portugal no ano de 2017, cujo valor era de 1,4% (Eurostat, 2018).



A deriva do preço da energia substituída pode ser definida como o aumento do preço da energia convencional do sistema, que será parcialmente substituída pela energia fornecida pelo sistema solar, acima do nível da inflação (Aguiar e Coelho, 2012). Como neste sistema a energia convencional não provém de uma fonte externa, como é o caso, por exemplo, das energias provenientes dos combustíveis fósseis, sendo um resíduo da própria indústria da cortiça, foi definido que não haverá um aumento do preço da energia convencional do sistema acima do nível da inflação, e, portanto, este parâmetro teria um valor nulo.

Por rendimento de aplicação financeira segura entende-se uma aplicação financeira, como por exemplo um depósito bancário, com um risco baixo, semelhante ao do sistema solar possuir uma avaria ou dano irreparáveis antes do fim do tempo de vida previsto para este (Aguiar e Coelho, 2012). Actualmente este risco é baixo, já que a fiabilidade dos sistemas solares é grande, não só pela evolução que estes tiveram, como pela evolução que se tem verificado na certificação de componentes e na formação de projectistas e instaladores ao longo do tempo. Foi definido então que o rendimento de aplicação financeira segura seria em obrigações de tesouro, que consiste na emissão de títulos de dívida pública do Estado, a 5 anos. O valor para este rendimento foi retirado do portal [www.igcp.pt](http://www.igcp.pt) e é de 0,7%. Considerou-se o valor do certificado de aforro do Estado Português, neste caso emitido para o mês de maio de 2018.

Quanto ao custo específico do sistema, que pode ser definido como o custo do sistema por m<sup>2</sup> de área dos colectores instalados, pode ser calculado recorrendo à equação da recta da figura 22, do capítulo 2, substituindo a incógnita x da equação pela área total de colectores:

$$y = 634,09e^{-7E-0,4x} \Leftrightarrow y = 634,09e^{-7E-0,4*200,6} = 551,02 \text{ €}$$

O custo específico do sistema inclui, tal como referido no capítulo 2, os custos com os equipamentos, tais como os colectores solares, a rede de distribuição de energia térmica, as construções auxiliares, o sistema de armazenamento de energia térmica, o projecto, e a instalação e comissionamento sem subsídios.



O custo inicial de instalação do sistema, calculado multiplicando o custo específico do sistema pela área de colectores, irá possuir um valor de 110 531 €. Os custos de operação e manutenção anuais do sistema serão de cerca de 1% do custo inicial de instalação, portanto estes custos terão um valor de 1 105 €/ano. De referir também que o sistema solar térmico vai ser adicionado ao sistema de combustão de pó de cortiça já existente previamente na fábrica, e, portanto, também existirão custos de operação e manutenção deste sistema de combustão, mas que não irão ser contabilizados nos custos finais do sistema solar térmico.

Há que definir também o custo da energia complementar, que vai ser parcialmente substituída pela energia do sistema solar. Não há muitas referências disponíveis sobre o preço actual do pó de cortiça, derivado do facto de este tipo de resíduo acabar maioritariamente por ser utilizado como combustível energético pela própria indústria da cortiça, não sendo vendido para o exterior. Segundo Castro (2016) o custo da venda do pó de cortiça é de 20 €/tonelada, e será este o valor de referência utilizado para a análise do sistema.

Como já foi referido no capítulo 4.2, o PCI do pó de cortiça é de 18,9 MJ/kg, com um rendimento global do sistema de 80%. Portanto a energia fornecida pelo pó de cortiça por massa de combustível possuirá um valor de 15,12 MJ/kg. Logo:

$$\text{Custo específico do pó de cortiça} = \frac{0,02}{15,12} = 0,001 \text{ €/MJ}$$

O custo específico da energia solar produzida pelo sistema disponibilizado pelo SolTerm é de 0,024 €/kWh, o que equivale a um valor de custo específico de 0,007 €/MJ. Como se pode observar o custo da energia solar produzida pelo sistema é significativamente mais elevado que o custo do pó de cortiça e, como é evidente, a adopção de um sistema solar só se torna vantajoso do ponto de vista financeiro se o seu custo específico for pelo menos igual ao da energia convencional. Mesmo se ambos os custos forem iguais, isso muitas vezes pode não ser suficientemente atractivo para quem investe, pois os sistemas





de energia solar requerem um investimento inicial elevado. Assim, para que a opção de adopção de um sistema solar seja compensatória ou interessante em termos financeiros, é necessário que o custo da energia solar fique significativamente abaixo do preço da energia convencional, tipicamente algo entre os -15% a -30%, o que não é o caso deste sistema (Aguiar e Coelho, 2012).

Analisando o VAL do sistema, para o valor de inflação de 1,4% definido, verificamos que este possui um valor negativo de -141 088 €. Pode-se concluir então que a instalação do sistema solar não é financeiramente compensadora e que nos 25 anos de vida útil do sistema não se receberia o valor do capital investido, e para que o seja, é necessário um incentivo financeiro ao investimento.

A título comparativo refere-se os resultados da análise económica do sistema para temperaturas de fornecimento de 60°C e 80°C, mantendo iguais os pressupostos económicos apresentados neste subcapítulo. O sistema mantém-se economicamente inviável, com o VAL da temperatura de fornecimento de 60°C a apresentar um valor negativo de -155 361 € e o da temperatura de fornecimento de 80°C a apresentar um valor negativo de -154 432 €.

## **5.2. Programas de incentivos económicos para viabilizar a instalação de um sistema solar na indústria da cortiça**

Neste capítulo iremos analisar o nível de incentivos económicos que seriam necessários para que o investimento neste sistema de energia solar na indústria da cortiça seja viável financeiramente. De referir também que os programas de incentivos podem ser diversos, sendo que foram considerados nesta análise os incentivos ao investimento.

Numa primeira análise importa perceber que incentivos ao investimento seriam necessários realizar para que o VAL do sistema tenha um valor nulo, ou seja, para que o sistema não seja lucrativo, mas também não apresente custos adicionais relativamente ao convencional (ao custo actual da venda do pó de cortiça). A tabela 11 apresenta o



resultado desta análise (note-se que a 2ª coluna da tabela corresponde à análise económica apresentada em 5.1) e verificou-se que com o valor de custo de venda do pó de cortiça seria necessário um incentivo superior a 100% do investimento inicial do sistema solar térmico. Esse valor de incentivo é igual a 107,2% do investimento inicial do sistema, apresentando um custo específico com um valor de 590,7 €/m<sup>2</sup>. Foi também analisado qual teria de ser o custo específico do pó de cortiça no caso em que o incentivo ao investimento fosse nulo para obter um período de retorno financeiro ao fim de 16, 12, 8 e 4 anos, sendo apresentado o respectivo valor de VAL para cada caso. Os resultados desta análise podem também ser observados na tabela 11.

**Tabela 11: Resultados da análise para um incentivo nulo e incentivo que faz com que o VAL tenha valor nulo no investimento inicial do sistema solar**

| T= 99°C, 70 L/m <sup>2</sup> , 85 colectores |         |       |        |        |        |         |
|--|---------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Incentivo (%)                                | 0       | 107,2 | 0      | 0      | 0      | 0       |
| Custo do pó de cortiça (€/kg)                | 0,02    | 0,02  | 0,37   | 0,49   | 0,72   | 1,43    |
| Período de retorno (anos)                    | >25     | 25    | 16     | 12     | 8      | 4       |
| VAL (€)                                      | -141088 | 0     | 274963 | 417610 | 691015 | 1535004 |

Analisando a tabela 11 é possível observar, como era expectável, que quanto maior for o preço de venda do pó de cortiça, mais curto será o período de retorno de investimento e maior será o VAL. É possível verificar também que, para obter um período de retorno curto, como por exemplo igual a 4 anos, o custo de venda do pó de cortiça teria que ser muito mais elevado do que é na actualidade. Importa então perceber que tipo de incentivos poderiam ser considerados para que o sistema se torne mais atractivo em termos financeiros para possíveis investimentos.

Foram considerados vários cenários alternativos, considerando incentivos iguais a 25%, 50%, 75% e 100% do valor do investimento do sistema solar. Para estas percentagens foi determinado qual teria de ser o preço específico do pó de cortiça de forma a obter um retorno do investimento no tempo de vida útil do sistema (25 anos) e ao fim dos anos já



estipulados para a tabela 11. Foi também calculado o VAL para cada um destes casos. Os resultados<sup>4</sup> podem ser observados nas tabelas 12, 13, 14 e 15.

**Tabela 12: Resultados da análise para um incentivo igual a 25% do investimento inicial do sistema solar**

| Incentivo = 25% do investimento |         |       |        |        |        |         |
|---------------------------------|---------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Incentivo (%)                   | 25      | 25    | 25     | 25     | 25     | 25      |
| Custo do pó de cortiça (€/kg)   | 0,02    | 0,12  | 0,28   | 0,37   | 0,55   | 1,08    |
| Período de retorno (anos)       | >25     | 25    | 16     | 12     | 8      | 4       |
| VAL (€)                         | -121466 | 10683 | 200876 | 307861 | 521830 | 1151850 |

**Tabela 13: Resultados da análise para um incentivo igual a 50% do investimento inicial do sistema solar**

| Incentivo = 50% do investimento |        |      |        |        |        |        |
|---------------------------------|--------|------|--------|--------|--------|--------|
| Incentivo (%)                   | 50     | 50   | 50     | 50     | 50     | 50     |
| Custo do pó de cortiça (€/kg)   | 0,02   | 0,09 | 0,20   | 0,26   | 0,38   | 0,73   |
| Período de retorno (anos)       | >25    | 25   | 16     | 12     | 8      | 4      |
| VAL (€)                         | -75293 | 7917 | 138676 | 209999 | 352645 | 768696 |

**Tabela 14: Resultados da análise para um incentivo igual a 75% do investimento inicial do sistema solar**

| Incentivo = 75% do investimento |        |      |       |        |        |        |
|---------------------------------|--------|------|-------|--------|--------|--------|
| Incentivo (%)                   | 75     | 75   | 75    | 75     | 75     | 75     |
| Custo do pó de cortiça (€/kg)   | 0,02   | 0,06 | 0,11  | 0,15   | 0,21   | 0,38   |
| Período de retorno (anos)       | >25    | 25   | 16    | 12     | 8      | 4      |
| VAL (€)                         | -42396 | 5153 | 66966 | 112137 | 183460 | 385542 |

<sup>4</sup>Para determinar o custo do pó de cortiça a partir do qual o projecto é viável (VAL = 0) foi feita uma análise iterativa. A partir do seu valor actual aumentou-se o custo do pó de cortiça até o VAL ser positivo. A análise foi feita com uma precisão de  $1 \times 10^{-2}$  €, o que conduziu a resultados em que o VAL > 0.





**Tabela 15: Resultados da análise para um incentivo igual a 100% do investimento inicial do sistema solar**

| Incentivo = 100% do investimento |       |      |       |        |        |        |
|----------------------------------|-------|------|-------|--------|--------|--------|
| Incentivo (%)                    | 100   | 100  | 100   | 100    | 100    | 100    |
| Custo do pó de cortiça (€/kg)    | 0,02  | 0,03 | 0,1   | 0,2    | 0,3    | 0,4    |
| Período de retorno (anos)        | >25   | 1    | 1     | 1      | 1      | 1      |
| VAL (€)                          | -9499 | 2388 | 85598 | 204470 | 323342 | 442214 |

Pode-se observar pelas tabelas anteriores que quanto menor for o valor do período de retorno para o mesmo valor de incentivo, maior terá de ser o custo do pó de cortiça. Pode ser observado também que quanto maior é o incentivo, menos tem de aumentar o custo do pó de cortiça. No entanto incentivos ao investimento tão elevados como 75% ou 100% do investimento inicial do sistema solar não são comuns e, portanto, os resultados obtidos nestas tabelas não serão discutidos com tanto pormenor.

Na tabela 12 pode ser observado que, para incentivos de 25% do investimento inicial do sistema solar, se verifica que o custo do pó de cortiça teria de custar no mínimo 0,12 €/kg, com um VAL de 10 683 €, para que a implementação do sistema solar seja rentável, uma vez que um custo inferior a este valor teria um período de retorno superior ao tempo de vida útil definido para o sistema solar. Definindo que não é atractivo um período de retorno superior a 8 anos para um possível investimento, constata-se que o pó de cortiça não poderia ter um custo inferior a 0,55 €/kg, o que é um valor consideravelmente acima do seu custo actual. O investimento correspondente a um período de retorno do sistema igual a 8 anos possui um VAL de 521 830 €. Para atingir um período de retorno do sistema igual a 4 anos seria necessário haver um custo de venda do pó de cortiça de 1,08 €, um valor bastante desfasado daquele que se pratica actualmente. Este período de retorno de 4 anos faria com que o sistema possuísse um VAL bastante elevado, de 1 151 850 €.



Na tabela 13 pode ser observado que, para incentivos de 50% do investimento inicial do sistema solar, se verifica que o custo de venda do pó de cortiça teria de ser no mínimo 0,09 €/kg para que o período de retorno não seja superior em termos temporais ao tempo de vida útil do sistema, sendo que o VAL teria um valor positivo de 7 917 €. Para um período de retorno igual a 8 anos constata-se que o pó de cortiça teria que ter um custo de venda de 0,38 €/kg, o que apesar de ser um valor inferior para o mesmo período de retorno comparativamente a um incentivo de 25% do investimento no sistema, ainda assim se trata de valor consideravelmente acima do seu custo real actualmente. O período de retorno do sistema igual a 8 anos possui um VAL de 352 645 €. Para atingir um período de retorno do sistema igual a 4 anos seria necessário haver um custo de venda do pó de cortiça de 0,73 €/kg. Este período de retorno de 4 anos faria com que o sistema possuísse um VAL bastante elevado, de 768 696 €.

Aos preços actuais de venda do pó de cortiça a introdução deste sistema solar térmico para produção de calor de processo não é compensatória e viável do ponto de vista económico, mas é expectável que a energia solar se torne mais competitiva e rentável nos próximos anos. Este fenómeno pode ser explicado não só porque o custo de instalação e manutenção da energia solar terá tendência a ir diminuindo progressivamente com o tempo, como pelo provável aumento dos preços dos combustíveis fósseis ao longo dos próximos anos (Skog e Rosen, 1997). O aumento do preço dos combustíveis fósseis é expectável porque são recursos finitos, não renováveis à escala humana, e cuja extracção se tornará cada vez mais dispendiosa financeiramente devido às elevadas profundidades em que estas matérias-primas se vão encontrar no futuro (mais no caso do petróleo e gás natural, não se aplicando tanto ao carvão). Para além disso o seu mercado financeiro é um mercado volátil, estando centrado num conjunto restrito de países que definem as regras do mercado (Velho, 2014).

Também é expectável que o custo de venda do pó de cortiça vá subindo gradualmente ao longo dos próximos anos, não só pela ocorrência do expectável aumento do preço dos combustíveis fósseis, mas porque também irá existir uma cada vez maior procura para fins energéticos deste tipo de resíduo. É expectável que a biomassa, onde se inclui o pó



de cortiça, irá ser bastante usada como matéria-prima na indústria química, nomeadamente para a produção de bioplásticos, o que pode gerar consequentemente um aumento do seu valor de mercado. A biomassa é também um recurso cuja combustão provoca uma muito menor emissão de gases com efeito de estufa comparativamente aos combustíveis fósseis (ver subcapítulo 4.4). Havendo uma necessidade actual de redução de emissões de gases de efeito de estufa por questões ambientais e de sustentabilidade do nosso planeta, a biomassa pode assim sair valorizada e aumentar consequentemente o seu valor de mercado.

Se, como é expectável, o pó de cortiça atingir custos de venda cada vez maiores ao longo dos próximos anos, poderá tornar-se atractivo financeiramente para a indústria da cortiça vender este recurso em vez de fazer a sua combustão e utilizá-lo como fonte energética. É neste contexto que a introdução de um sistema solar térmico na indústria da cortiça poderia ser compensatória e tornar-se viável em termos financeiros, e esta correlação entre o aumento do custo de venda do pó de cortiça e a viabilidade da introdução do sistema solar térmico pode ser constatada nas tabelas 11 a 15. O sistema solar térmico iria então suprir a menor disponibilidade do pó de cortiça como fonte energética, garantindo assim as necessidades energéticas inerentes à indústria da cortiça, nomeadamente para a produção de calor de processo.





## 6. Conclusões

O sector industrial possui um papel com grande relevância no que toca ao consumo de energia final nos países pertencentes à UE28 (25%). Nestes países as necessidades de calor de processo para temperaturas inferiores a 200°C perfazem uma percentagem de utilização de 38% das necessidades de calor de processo. Esta contribuição é bastante significativa e mostra que pode haver um elevado potencial para a introdução de sistemas solares térmicos para produção de calor no sector industrial. Actualmente o sector é muito dependente dos combustíveis fósseis, que são a principal fonte energética utilizada no consumo de energia final no sector da indústria para os países pertencentes à UE28, representando o gás, o carvão e o petróleo uma contribuição de 53%.

Apesar do elevado potencial, a utilização de sistemas solares na indústria ainda é pequeno. No final de 2018 existiam 308 sistemas solares térmicos em operação no mundo e uma potência térmica instalada de cerca de 240 MW<sub>t</sub>, equivalendo a um total de praticamente 425 000 m<sup>2</sup> de colectores solares instalados. Uma grande parte dos sistemas referidos anteriormente são actualmente de natureza experimental e de relativamente pequena escala, sendo que apenas 35 possuem uma área de colectores superior a 1000 m<sup>2</sup>. Dentro do total dos sistemas solares operacionais cerca de 52,3 % são baseados em tecnologias de colectores solares planos, 18,8 % de colectores solares concentradores cilindro-parabólicos, 14,9 % de colectores solares de tubos de vácuo, 4,2% de colectores solares concentradores lineares de Fresnel e 9,74% são de outro tipo de colectores ou de vários tipos de colectores diferentes instalados na mesma central. Conclui-se então que é necessário promover a utilização de sistemas de energia solar térmica na indústria.

Um dos sectores industriais onde é possível a utilização de sistemas solares térmicos para a produção de calor de processo é a indústria da cortiça, que tem uma importância estratégica para Portugal. O nosso país tem sido, nas últimas décadas, o líder mundial na produção de cortiça natural, possuindo 34% da área total de montado de sobre a nível mundial. A fabricação de rolhas domina o sector da cortiça, com mais de metade das empresas em Portugal deste sector a dedicar-se a esta actividade económica. No que diz



respeito aos processos da indústria da cortiça que requerem uma quantidade intensiva de calor, estes estão relacionados com os processos de cozedura e de secagem das pranchas de cortiça natural e aglutinação de grânulos de cortiça durante o fabrico de produtos de cortiça aglomerada. Quanto às fontes energéticas mais utilizadas nas caldeiras de combustão na indústria da cortiça em Portugal, estas fontes são provenientes principalmente do pó de cortiça, um resíduo proveniente da própria indústria corticeira, mas também de lenha, resíduos florestais ou derivados de petróleo.

Neste contexto, esta dissertação teve como objectivo estudar a viabilidade tecnoeconómica da introdução de um sistema solar térmico para a geração de calor no processo de cozedura de pranchas de cortiça em bruto. Considerou-se que o sistema pré-existente para geração de calor, e que dará apoio ao sistema solar, opera através da combustão de pó de cortiça. Propôs-se um sistema solar térmico que ou fará o pré-aquecimento da água de cozedura ou o aquecimento até à temperatura de processo e foram discutidas e analisadas as melhores opções em termos energéticos e económicos para a introdução do sistema. Este foi dimensionado através dos resultados da fracção solar anual das necessidades energéticas e da viabilidade económica do investimento, para diferentes volumes de armazenamento, número de colectores e temperaturas de armazenamento.

A análise energética do sistema solar térmico permitiu concluir que o número de colectores solares presentes no sistema deverá ser de 85, com uma área total de cerca de 200 m<sup>2</sup> e atingindo uma temperatura de fornecimento de 99°C. Os 85 colectores são o número mínimo que garante que o volume mínimo do sistema (14 m<sup>3</sup>) é respeitado, sendo que o volume de armazenamento específico que permite este número de colectores é de 70 L/m<sup>2</sup>. O sistema solar possui uma fracção solar de 47,8%, fornecendo praticamente metade dos 351 966 kWh da demanda energética do processo, tornando a instalação do sistema solar compensatória em termos energéticos. O rendimento global anual do sistema, definido como a razão entre a energia de origem solar fornecida para consumo e a disponível à face dos colectores, apresenta um valor de 43%. As emissões do sistema híbrido solar térmico/biomassa são de 1,62 ton CO<sub>2</sub> eq/MJ, sendo que as emissões de CO<sub>2</sub>



evitadas pelo sistema híbrido solar térmico/biomassa, comparativamente a se o sistema tivesse como fonte de combustível o gás natural, são de 93,75 ton CO<sub>2</sub> eq/MJ.

Na análise de viabilidade financeira foi concluído que no tempo de vida útil do sistema (25 anos) não se receberia o valor do capital investido e que a sua instalação não é financeiramente compensadora e, para que o seja, serão necessários incentivos financeiros ao investimento. Para que o VAL do sistema possua um valor nulo, ou seja, este não ser lucrativo, mas também não apresentar custos adicionais relativamente ao custo actual da venda do pó de cortiça, verificou-se que seria necessário um investimento de 107,2% do capital investido inicialmente na aquisição do sistema solar, sendo que este investimento teria um custo específico com um valor de 590,7 €/m<sup>2</sup>. Para um período de retorno financeiro atraente para as empresas, como 4 anos, para um investimento de 25% do total do sistema, o pó de cortiça teria de custar 1,08 €, com um VAL de 115 1850 €. Se o valor de investimento subir para 50% do total do sistema, o preço de venda do pó de cortiça baixaria para 0,73 €, com um VAL de 768 696 €. Para um período de retorno financeiro superior, como por exemplo 8 anos, para um investimento de 25% do total do sistema, o pó de cortiça teria de custar 0,55 €, com um VAL de 115 1850 €. Se este valor de investimento subir para 50% do total do sistema, o preço de venda do pó de cortiça baixaria para 0,38 €, com um VAL de 352 645 €.

Uma das limitações encontradas ao longo do trabalho foi o facto de existirem poucas referências disponíveis sobre o preço actual de venda do pó de cortiça, sendo este um parâmetro essencial para uma correcta análise financeira do sistema em estudo neste trabalho. O pó de cortiça é o resíduo produzido em maior quantidade na indústria da cortiça, sendo maioritariamente utilizada como combustível em caldeiras desta indústria. Uma pequena percentagem deste resíduo é também utilizada na colmatação de rolhas de cortiça natural. Ao ser utilizado na própria indústria corticeira, o pó de cortiça, salvo raras excepções, não é vendido para o exterior, e este facto ajuda a explicar a falta de referências disponíveis sobre o preço actual de venda deste resíduo.





Quanto às recomendações de trabalho futuro, é necessário realçar que este estudo incidiu apenas num processo, que é o do sistema solar térmico fornecer o calor necessário para elevar a água de processo à temperatura necessária para iniciar o processo de cozedura das pranchas de cortiça no tanque de cozedura. Existem outros processos na indústria da cortiça que necessitam de elevadas necessidades de calor, podendo vir a ser estudada a viabilidade energética e económica da introdução de um sistema solar térmico para gerar o calor necessário a esses processos.

Este estudo pretende ser uma contribuição para a descarbonização do sector da indústria, neste caso na indústria da cortiça, analisando a possibilidade da introdução neste sector de um sistema solar térmico para geração de calor de processo e estudando as dificuldades e desafios inerentes a essa introdução. O custo da introdução e manutenção do sistema e a sua viabilidade económica continuam a ser a principal barreira a quem deseja investir neste tipo de sistema e o principal factor que influencia a sua introdução.



## 7. Referências

Aguiar, R., & Coelho, R. (2012). Manual de Instalação e Utilização do software SolTerm. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, IP Lisboa.

Amorim (2007). Sustainability report 2006, Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A.

Amorim (2016). Sustainability report 2015, Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A.

APCOR (2018). Anuário 2018/2019, Associação Portuguesa de Cortiça (APCOR).

APCOR (2018). Boletim Estatístico 2017/2018, Associação Portuguesa de Cortiça (APCOR).

APISOLAR, A. (2015). Observatório Solar Térmico. Relatório & Estatísticas Solar Térmico, Associação Portuguesa da Indústria Solar, Portugal.

Bhatia, A. (2012). Improving energy efficiency of boiler systems. Continuing education and development engineering, 1-55.

Biencinto, M., Gonzalez, L., Valenzuela, L., & Fernández, A. (2014). Design and simulation of a solar field coupled to a cork boiling plant. Energy Procedia, 48, 1134-1143.

Castro, A. A. (2016). Integration of a concentrating solar thermal system in an expanded cork agglomerate production line. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

Concorrência, A. D. (2012). Relatório Final Análise do sector e da fileira da cortiça em Portugal. Lisboa: Autoridade da Concorrência.



Cottret, N., & Menichetti, E. (2010). Technical Study Report on SOLAR HEAT FOR INDUSTRIAL PROCESSES (SHIP) State of the art in the Mediterranean region. Observatoire Méditerranéen de l'Energie: Nanterre, France.

Devanarayanan, K., & Murugavel, K. K. (2014). Integrated collector storage solar water heater with compound parabolic concentrator–development and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 51-64.

DGGE (2004). Utilização de Colectores Solares para a Produção de Calor de Processo. Lisboa, Portugal: DGGE/IP-AQSpP.

Eurostat (2018). <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (acedido a 1 de Agosto de 2018).

Fraunhofer ISI, et al (2016). Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables). WP1. ENER/C2/2014-641. European Commission.

Gabinete de Estratégia e Planeamento (GEP) – Ministério do Trabalho, Solidariedade e Segurança Social (MTSSS) (2017).

Garcia, N. P., Vatopoulos, K., Krook-Riekkola, A., Lopez, A. P., & Olsen, L. (2012). Best available technologies for the heat and cooling market in the European Union. Publications Office of the European Union.

Gil, L. (1997). Cork powder waste: an overview. *Biomass and Bioenergy*, 13(1-2), 59-61.

Gil, L., Aspectos Energéticos Relacionados com a Transformação da Cortiça, *Revista Energia*, Year XII, Issue Abr/Jun, pp 5-10, 1998.





Gil, L. Cortiça: Produção, Tecnologia e Aplicação, Edições INETI, Lisboa, 1998.

Gonçalves, J. A. M. R., & Amaro, A. (2005). A utilização e valorização da propriedade industrial no sector da cortiça. Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Lisboa, 3.

Helmke, A. & Hess, S. (2015). Classification of Solar Process Heat System Concepts. Guideline for solar planners, energy consultants and process engineers giving a general procedure to integrate solar heat into industrial processes by identifying and ranking suitable integration points and solar thermal system concepts. IEA SHC Task, 49.

Horta, P. (2015). Process Heat Collectors: State of the Art and Available Medium Temperature Collectors. Solar Process Heat for Production and Advanced Applications. IEA SHC Task, 49.

ICNF, I. (2013). Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados Preliminares. Lisboa, Portugal: Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas.

IGCP (2018). <https://www.igcp.pt/pt/noticias/taxas-de-juro-dos-certificados-de-aforro-das-series-a-b-c-d-e-e-em-maio-de-2018/> (acedido a 11 de Junho de 2018).

INE, Instituto Nacional de Estatística (2017).

Infopédia (2018). <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/linóleo> (acedido a 31 de Maio de 2018).

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer [eds.]). IPCC, Genebra, Suíça, 151 pp.



IRENA (2015), A background paper to “Renewable Energy in Manufacturing, Março 2015.

Janse van Vuuren, Pieter & Basson, Lauren & Buckley, Angelo & Terblanche, Ulrich. (2017). Industrial Scale Solar Heat in South Africa: opportunities in agri-processing and textiles.

Kalogirou, S. A. (2013). Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press.

Lauterbach, C., Javid Rad, S., Schmitt, B., & Vajen, K. (2011). Feasibility assessment of solar process heat applications. In Solar World Congress, Kassel.

Lebeña, E. P., & Costa, J. C. (2006). Conversão Térmica da Energia Solar. SPES. Lisboa.

Liège, C. E. (2011). Código internacional das práticas rolheiras.

Mendes, J. F., Joyce, A., Giestas, M. C., Horta, P., & Brites, M. J. (2010). Armazenamento de energia solar térmica. LNEG, Lisboa.

Nepomuceno Pereira, R., Malico, I., Mesquita, P., Sousa, A. M., & Gonçalves, A. C. (2017). Energy use of cork residues in the Portuguese cork industry. 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems–SDEWES2017.

Rosa, C. A. & Tiago Filho, G. L. (2007). Solar. Série Energias Renováveis. CNRPCH, Itajubá, Brasil.

RETScreen (2005). Software Online User Manual, Canadá.

Riffelmann, K. J., Krüger, D., & Pitz-Paal, R. (2000). Solar Thermal Plants: Power and Process Heat.



Schmitt, B., Ritter, M., & Giovannetti, F. (2017) Solar process heat: Supporting industrial and commercial processes. BINE Information Services.

Schweiger, H., Mendes, J. F., Benz, N., Hennecke, K., Prieto, G., Cusí, M., & Gonçalves, H. (2000). The potential of solar heat in industrial processes. A state of the art review for Spain and Portugal. EuroSun.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., & Kandpal, T. C. (2017). Solar industrial process heating: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 124-137.

SHC Task 49 (2013). Solar Heat Integration in Industrial Processes – 2013 Highlights, IEA/SHC Programme.

Skog, K. E., & Rosen, H. N. (1997). United States wood biomass for energy and chemicals: possible changes in supply, end uses, and environmental impacts. Forest Products Journal, 47(2), 63.

Taibi, E., Gielen, D., & Bazilian, M. (2012). The potential for renewable energy in industrial applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (1), 735-744.

Ticona, E. M. (2003). Determinação Experimental do Coeficiente de Troca de Calor em um Gerador de “Pasta de Gelo” (Doctoral dissertation, PUC-Rio).

Velho, J. L. (2014). "Petróleo e energias renováveis. Portugal na encruzilhada." Edições Ex Libris, Lisboa.

Werke, V. (2008). Technical guide. Solar thermal systems. Report, 9449, 829.